

Untersuchung und Bewertung von Betriebskonzepten für das System eWay innerhalb gemischt hybrid angetriebener Flotten in der Transportlogistik Deutschlands

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)

von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) angenommene

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Hermann Paul Merkel

Tag der mündlichen Prüfung:

17.12.2025

Hauptreferent:

Prof. Dr.-Ing. Kai Furmans

Korreferent:

Prof. Dr.-Ing. Peter Vortisch

Vorwort

...genug Gründe, Dank zu sagen

Im Herbst 2019 fiel die Entscheidung der Landesregierung in Baden-Württemberg, auf der Bundesstraße 462 eine weitere Teststrecke für das System eHighway zu bauen. Auf diesem eWayBW sollten drei Jahre lang, unter einer knapp 5 km langen Oberleitung, Lastzüge im Pendelverkehr zwischen Fabriken im mittleren Murgtal und Speditionslägern nahe der A5 bei Rastatt fahren und zusätzliche Erkenntnisse zu diesem Verkehrssystem liefern. Da ich nicht einsehen konnte, weshalb ein neuer eWay gebaut werden muss, wenn auf den zwei vorhandenen Strecken insgesamt kaum fünf LKW unterwegs sind, habe ich mich öffentlich gegen den Bau dieser Strecke gestellt. Bei den Geschäftsführern der Werke, die an dieses Projekt angebunden werden sollten, wurde ich dafür hart kritisiert, denn in meiner früheren Tätigkeit als Leiter einer Spedition war ich viele Jahre für genau diese Transporte verantwortlich. In den folgenden Monaten reifte in mir der Entschluss, meine Kritik zu hinterfragen und entweder weitere Gründe für meine Ablehnung zu finden oder diese als unbegründet zu widerrufen. So kam ich Ende 2020 zu Herrn Professor Furmans an das IFL, an den Lehrstuhl, an dem ich fast fünfzig Jahre zuvor mein Ingenieursstudium abgeschlossen hatte, um herauszufinden, ob diese Fragestellungen für eine Dissertation taugen. In Anbetracht meines Alters und des aus dem üblichen Forschungsbereich des IFL herausfallenden Themas konnte ich nicht erwarten, eine Zusage zu bekommen. Jetzt, fünf Jahre später, kann ich diese Zeilen schreiben und mich bei Professor Furmans bedanken: dafür, dass er mir damals sein Vertrauen geschenkt und mir die Möglichkeit eröffnet hat, diese Arbeit schreiben zu können; dafür, dass er notwendige Kritik und Anleitung immer so geäußert hat, dass es mir leicht fiel,

diese in positives Handeln umzusetzen und dafür, dass sein Zuspruch dafür gesorgt hat, dass neue Energie und Zuversicht eingekehrt sind, wenn an Weiterkommen mal wieder nicht zu denken war. Vielen Dank auch an Herrn Professor Vortisch, der als Korreferent meine Arbeit begutachtet hat und an Herrn Professor Greiner, der als Vorsitzender meine Prüfung geleitet hat. Danke an die jungen Forscher am IFL, die mir manchen Tipp gegeben haben, mit denen ich so tolle Tage während der Winterseminare habe erleben können und die meine schwachen Leistungen beim Küchendienst ohne sichtbaren Groll hingenommen haben. Danke an Priscilla, die mich bei der Auswertung der Transportbeispiele auf *SATLOG* unterstützt hat und danke an Herrn Dr. Stausberg, der mir dieses Telematiksystem für meine Arbeit zur Verfügung gestellt hat. Zum Schluss, aber besonders wichtig, großen Dank an meine Frau, die mich unterstützt hat, mir Mut zugesprochen hat, fünf Jahre lang einen noch nervöseren Ehemann hat ertragen müssen und mitgeholfen hat, den Tag meiner Verteidigung so toll zu gestalten.

Kurzfassung

Hermann P. Merkel

Untersuchung und Bewertung von Betriebsmodellen für das System eWay innerhalb gemischt hybrid angetriebener Flotten in der Transportlogistik Deutschlands

Diese Arbeit untersucht, ob das von Siemens unter dem Namen eHighway auf einer Teststrecke in Brandenburg Siemens, 2012 entwickelte System in der Lage ist, die Dekarbonisierung des LKW-Verkehrs zu unterstützen. Zu diesem Zweck werden passende Betriebsmodelle gesucht, und es werden die speziellen Rahmenbedingungen beschrieben, die sich für deren Durchführung aus dem Güterkraftverkehrsgesetz (GüKG) und der Fahrpersonalverordnung ergeben. Es werden die möglichen Einsparungen an Schadstoffausstoß und die Änderung der Betriebs- und Systemkosten berechnet. In den Berechnungen werden in allen Modellen die Durchführung gleicher Touren zugrunde gelegt. Deren Anzahl und deren Fahrtstrecke sind identisch und es handelt sich um Komplettladungen (FTL). Als Referenz dienen mit Diesel angetriebene Lastzüge (SZM) mit einem zulässigen Gesamtgewicht (zGG) von 40 Tonnen. Für die Berechnung des CO₂-Ausstoßes wird von der Quelle zum Rad (WtW) ausgegangen. Zusätzlich werden durch die Auswertung von ungefähr 1.000 Transportbeispielen zu den Betriebsmodellen passende eWay-Strecken auf dem deutschen Autobahnnetz ermittelt und in Karten dargestellt. Wenn die SZM diese mit Oberleitungen elektrifizierten Strecken verlassen, müssen sie über hybride Antriebe verfügen. Diese werden beschrieben und deren Kosten für Anschaffung und Betrieb sind in allen Berechnungen berücksichtigt. Mit Blick auf die finanziellen Ressourcen von Transportbetrieben

macht diese Arbeit Aussagen zur Akzeptanz dieses Systems und zur Bereitschaft und Fähigkeit, die Betriebe auf dieses System umzustellen. Die Arbeit vergleicht eigene Ergebnisse mit denen aus Berichten von hauptsächlich drei Forschungsinstituten und benennt Übereinstimmungen und Unterschiede. Der bilaterale und der Transitverkehr sind nicht in die Berechnungen eingeflossen, werden aber mit ihren Einflussmöglichkeiten beschrieben. Schließlich wird in einer Fallstudie ermittelt, wie nach der politischen Entscheidung, das System eHighway in Deutschland einzuführen, die ersten Stufen des Markthochlaufs ablaufen könnten, welche Betriebsmodelle dazu geeignet wären und welche Veränderungen bei CO₂-Reduktion und bei Kosten auftreten.

Abstract

Hermann P. Merkel

Investigation and Evaluation of Operational Concepts for the eWay System within Mixed Hybrid-Powered Fleets in German Freight Transport Logistics

This work examines whether the system developed by Siemens under the name eHighway on a test track in Brandenburg (Siemens, 2012) is capable of supporting the decarbonization of truck traffic. For this purpose, suitable operating models are sought and the special framework conditions for their implementation are described, which arise from the Goods Transport Act (GüKG) and the Driving Personnel Ordinance. The possible savings in pollutant emissions and the change in operating and infrastructure costs are calculated. In the calculations, all models are based on the implementation of the same tours. The number and distance of these tours is the same and they are full loads (FTL). Diesel-powered truck tractors (SZM) with a permissible total weight (GVW) of 40 tons are used as a reference. For the calculation of the CO₂ emissions, the principle from Well to Wheel (WtW) is assumed. In addition, by evaluating around 1,000 transport examples, suitable eWay routes on the German motorway network are identified for the operating models and shown on maps. When the trucks leave these routes electrified with overhead lines, they must have hybrid drives. These are described and their costs for acquisition and operation are taken into account in all calculations. With regard to the financial resources of transport companies, this work makes statements about the acceptance of this system among freight forwarders and the willingness and ability of companies to convert to this system. The work compares its own results with those from reports from mainly three research institutes and identifies

similarities and differences. Bilateral and transit traffic are not included in the calculations, but are described with their potential influence. Finally, a case study determines how the first stages of the market ramp-up could proceed after the political decision to introduce the eHighway system in Germany, which operating models would be suitable for the use of the system and what changes occur in CO₂ reduction and costs.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	i
Kurzfassung	iii
Abstract	v
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangslage	1
1.2 Fragestellung	8
1.3 Zielsetzung	10
1.4 Definitionen	10
1.4.1 eWay	10
1.4.2 Hybride Antriebe	11
1.4.3 Sattelzugmaschine <i>SZM</i>	12
1.4.4 Referenzmodell	14
1.4.5 Der Grüne Strom	16
1.4.6 Der Grüne Wasserstoff	18
1.4.7 HVO-Diesel	22
2 Der eHighway	25
2.1 Trasse	27
2.2 Fahrzeuge	28
2.3 Ladeinfrastruktur	35
2.4 Teststrecken	38
2.4.1 Schweden	40
2.4.2 USA	40
2.4.3 ELISA in Hessen	40
2.4.4 FESH in Schleswig-Holstein	42

2.4.5	eWay <i>BW</i> in Baden-Württemberg	42
2.4.6	Teststrecken in Planung	43
2.5	Oberleitungsnetze	44
2.5.1	Ausbaustufe 1	45
2.5.2	Ausbaustufe 2	46
2.5.3	Ausbaustufe 4	47
2.5.4	Längenbestimmung	48
2.5.5	Parallele Strecken und Routenplanung	50
2.5.6	Auswertungen	51
2.5.7	Gewichtung	65
3	Entwicklung eines Betriebskonzeptes unter Nutzung des eHighway	69
3.1	Trampverkehr	84
3.1.1	Short Haul	87
3.1.2	Long Haul	88
3.2	Traktionsverkehr	88
3.2.1	Umschlagpunkte	95
3.2.2	Short Haul	97
3.2.3	Long Haul	98
3.3	Linienverkehr	102
3.4	Systemverkehr	104
3.4.1	Hub-Verkehr der großen Logistiknetzwerke in Deutschland .	106
3.4.2	Begegnungsverkehr	110
3.4.3	Kombi Verkehr	111
4	Mathematische Modellierung	117
4.1	Frachterlös EF	118
4.2	Gesamtkosten C_{ges}	121
4.2.1	Anschaffungskosten CA	122
4.2.2	Betriebskosten CB	123
4.3	CO ₂ -Kosten CC	135
4.4	Systemkosten C_{sys}	136
5	Parameterstudien	137
5.1	Basis-Parameter	138

5.2	Frachterlöse	143
5.3	CO ₂ -Ausstoß	148
5.4	Systemkosten	152
5.4.1	Einfluss der CO ₂ -Zertifikate	152
5.4.2	Einfluss der LKW-Maut	154
5.4.3	Einfluss des HO-Systems	158
5.4.4	Einfluss von Traktionsverkehr	162
5.4.5	Einfluss der Treibstoffkosten und Anschaffungspreise	170
5.5	Hub-Verkehr	172
6	Fallstudie eHighway	177
6.1	Beschreibung	178
6.2	Berechnungen	184
6.3	Bewertung	193
7	Zusammenfassung	195
A	Anhang	201
A.1	Transportlisten	202
A.1.1	Transportliste (stochastisch)	202
A.1.2	Transportliste der Spediteure	217
A.2	Depotlisten	220
A.3	Basisparameter	236
A.4	Literaturrecherche	242
A.5	Presseberichte	245
A.6	Oberleitungsnetze	251
	Abbildungsverzeichnis	265
	Tabellenverzeichnis	271
	Abkürzungen und Symbole	274
	Publikationsverzeichnis	287
	Literaturverzeichnis	289

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Am 20. August 2018 schwänzte eine junge Schülerin den Unterricht, um vor dem Reichstagsgebäude in Stockholm für ein besseres Klima zu protestieren. Am 7. Dezember schlossen sich das erste Mal deutsche Schüler diesem Schulstreik an. Inzwischen ist daraus die Bewegung „Fridays for Future“ geworden, die weltweit bis in höchste Regierungskreise Gehör findet und den Begriff „Pariser Klimaschutzabkommen“ in die breite Öffentlichkeit gebracht hat. Das dort festgeschriebene Ziel, die Erderwärmung auf möglichst unter 2 Grad Celsius zu beschränken, wurde allerdings schon 1996 vom Umweltrat der EU beschlossen und 2005 von den europäischen Staatsoberhäuptern bestätigt. 2007 erfolgte die Übersetzung dieses Temperaturziels in globale Emissionen. Demnach müssen im Vergleich zu 1990, bis zum Jahr 2050 die globalen Treibhausgasemissionen in etwa halbiert werden (Höhne et al., 2020, S. 1). Nachdem zwischenzeitlich diverse Studien zum Ergebnis gekommen waren, dass die Gefahr besteht, mit den bestehenden Planungen Gefahr zu laufen, dass nicht mehr umkehrbare Klimaveränderungen eintreten könnten, hat man im Pariser Abkommen das ursprüngliche Ziel verschärft, und die Erderwärmung soll gegenüber dem vorindustriellen Niveau nur noch um 1,5 Grad wachsen dürfen. Siehe (Höhne et al., 2020, S. 1) und (Schmidpeter, 2012).

Verursacht wird die Erderwärmung hauptsächlich durch das Verbrennen fossiler Energieträger wie Kohle, Erdgas und Erdöl. Deren Verwendung steigt seit Beginn der Industrialisierung bis heute ungebrochen, wie Abb. 1.1 zeigt. Beim Verbrennen entsteht CO_2 , bei gleichzeitiger Vernichtung oder Veränderung der

CO₂ emissions by fuel or industry type, World

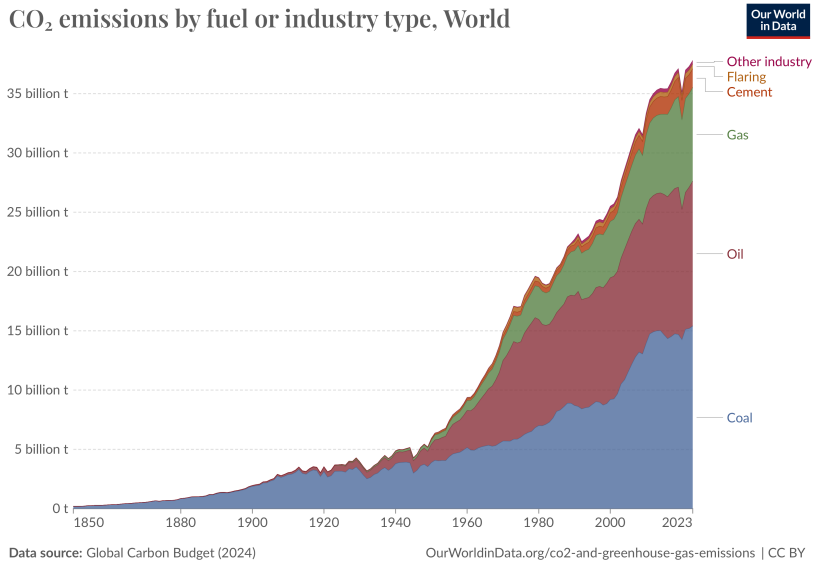


Abbildung 1.1: Globale CO₂-Emissionen

großen CO₂-Speicher Wald und Ozean (Neubäumer, 2019, S.798). Auftauender Permafrostboden setzt Methan frei, das in seiner Wirkung als Treibhausgas noch schädlicher als CO₂ ist. Aus den wärmer werdenden Ozeanen verdampft mehr Wasser und dieser Wasserdampf wirkt in der Atmosphäre ebenfalls als Treibhausgas. Auch dieser Rückkopplungsprozess führt dazu, dass die Durchschnittstemperaturen steigen, und tatsächlich war das Jahr 2023 das heißeste seit Beginn der Aufzeichnungen. Die Abb. 1.2 aus der Datenbank des Umweltbundesamts (UBA) zeigt, welche Stoffe dabei beteiligt sind. Trotz deren unterschiedlicher Wirkungsstärke steht, aufgrund des dominierenden Mengenanteils, das CO₂ im Vordergrund. Die in dieser Arbeit gemachten Berechnungen beziehen sich daher ausschließlich auf dieses Gas.

Der Verkehrssektor bedingt (nach Abb. 1.4) knapp 20% der Treibhausgasemissionen in Deutschland und laut Wietschel, Gnann et al. (2017, Abb. 1) hat der

LKW-Verkehr daran einen Anteil von ebenfalls rund 20%, wobei der Hauptteil von 30% auf die schweren LKW ab 12 t zulässigem Gesamtgewicht (zGG) entfällt.

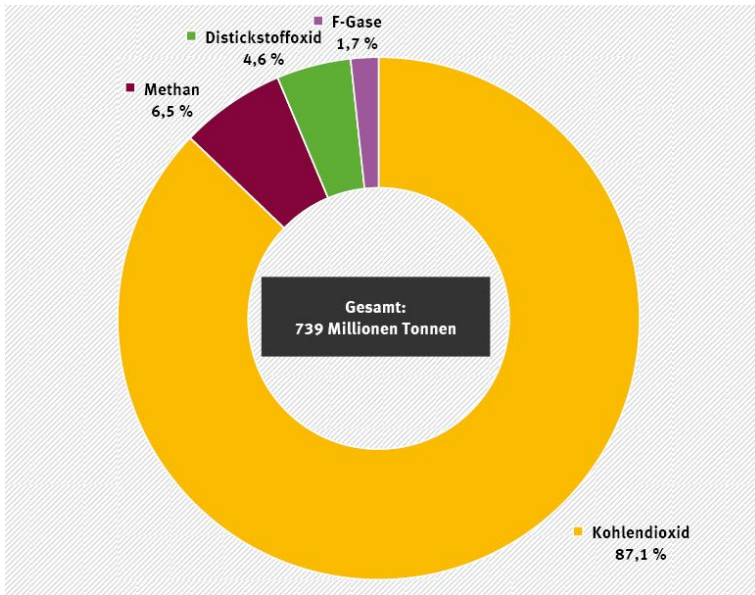


Abbildung 1.2: Treibhausgase, Anteil am Gesamtausstoß in Deutschland (Quelle:UBA,2022)

Obwohl die Motoren in PKW und LKW (Abb. 1.3) immer weniger Schadstoffe ausstoßen, sind die Anteile des Verkehrs an den Treibhausgasemissionen in den letzten Jahren nicht gesunken (Abb. 1.4). Die Gründe liegen in den steigenden Zahlen bei PKW- und LKW-Bestand und in der Zunahme der Fahrtstrecken.

Weltweit steigender Wohlstand, arbeitsteilige Produktion, Globalisierung und der rasant wachsende Onlinehandel haben auch zu einer Zunahme des Güterverkehrs auf der Straße geführt. Zwischen 2012 und 2018 hat der Bestand an Lastkraftwagen (LKW) in Deutschland um 22% zugenommen (siehe Abb. 1.5). Die Verkehrsleistung, gemessen in Tonnenkilometern, hat im gleichen Zeitraum in Deutschland

EU-Emissionsgrenzwerte für Lkw-Dieselmotoren

In der Vergangenheit gingen die Emissionsgrenzwerte für die Schadgase NO_x, CO, von Kohlenwasserstoffen und Feinstaub bereits um 87,8% bis 97,5% zurück. Wir haben heute die saubersten Dieselfahrzeuge, die es je gab. Das

Straßengüterverkehrsgewerbe will auch in Zukunft seinen Beitrag zur Reduzierung der CO₂-Emissionen leisten – die Maßnahmen müssen nur machbar und wettbewerbsneutral im Vergleich zu europäischen Marktteilnehmern sein.

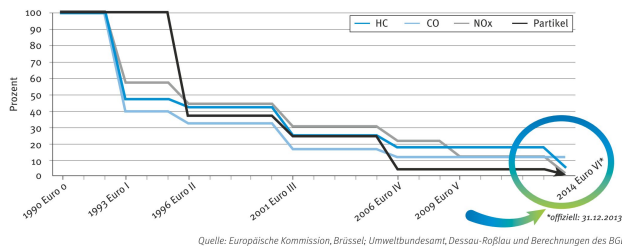


Abbildung 1.3: Emissionsgrenzwerte für LKW-Dieselmotoren

nur um rund 3% zugenommen, was den zunehmenden Anteil leichter Transportgüter widerspiegelt (BMVI, 2020). Dazu trägt auch der Onlinehandel bei. Vor allem der Bereich B2C, mit der wachsenden Zahl von Paketsendungen an private Konsumenten, in jüngster Zeit sogar aus China. Übereinstimmend wird mit einem weiteren Anstieg der Verkehrsleistung gerechnet, und der Anteil auf der Straße wird dabei weiter wachsen.

Unter dem Namen *Energiewende* wurden in Deutschland die letzten Atomkraftwerke abgeschaltet und Heizungen sollen nicht mehr mit Öl und Gas betrieben werden. Industrieprozesse sollen auf klimaneutrale Verfahren umgestellt werden, und die *Verkehrswende* soll garantieren, dass auch der Verkehrssektor ohne CO₂-Emissionen auskommt. Dazu nennt der Koalitionsvertrag der Bundesregierung (2021) eine Vielzahl von Maßnahmen, wie:

- Ausbau des öffentlichen Personennahverkehrs
- Implementierung von Carsharing-Modellen (Göhlich und Raab, 2021, Kapitel 2.3)
- Ertüchtigung des Eisenbahnverkehrs für Fracht und Personen durch diverse technische und bautechnische Maßnahmen
- Verlagerung von Verkehren von der Straße auf die Schiene durch Steuerungselemente wie vor allem die Ausgestaltung der LKW-Maut
- Verbot fossiler Antriebe bei den Fahrzeugen

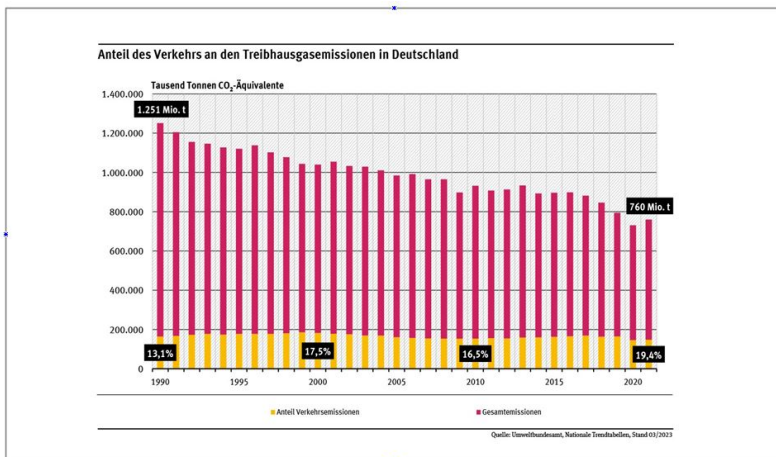


Abbildung 1.4: Anteil des Verkehrssektors an den Treibhausgasemissionen

Ab 2035 sollen unter der Überschrift *Verbrenneraus* neue Fahrzeuge nicht mehr mit fossilen Treibstoffen wie Benzin und Diesel betrieben werden, sondern hauptsächlich mit *grünem Strom*. Tatsächlich sind unter dem Einfluss staatlicher Verkaufsförderung die Neuzulassungen vollelektrischer und hybridelektrischer PKW zunächst stark gestiegen (Abb. 1.6), bis sie im Jahr 2024 wieder stagnieren.

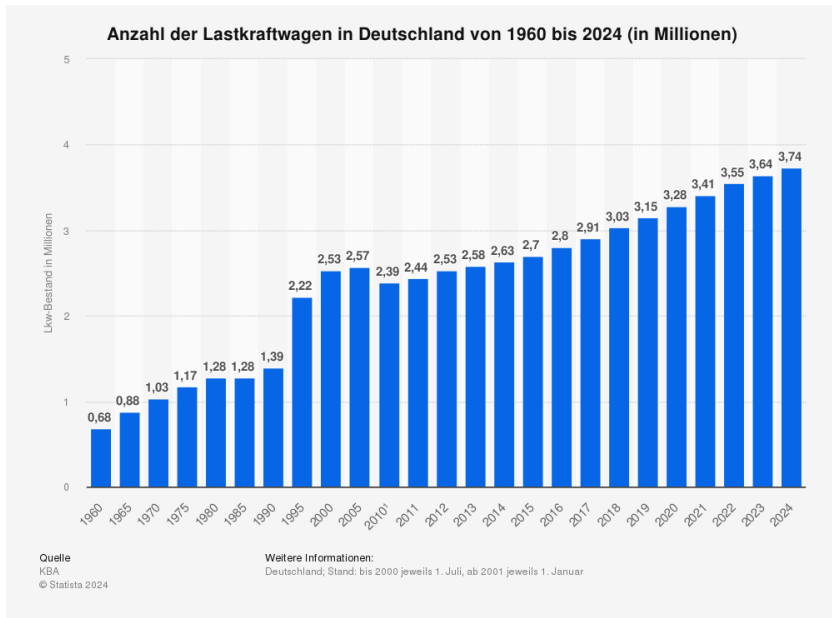


Abbildung 1.5: LKW-Bestand in Deutschland

Parallel beginnt eine Absatzbewegung vom zuvor postulierten *Verbrenner* aus. Auch Automobilhersteller, die bereits Produktionsbänder auf E-Autos umgestellt hatten, bringen mit dem Stichwort *Technologieoffenheit* nun synthetische Treibstoffe, wie HVO-Diesel, ins Spiel und wollen auch nach 2035 noch Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren bauen.

Als umweltfreundliche Energiequelle für den Antrieb von Lastkraftwagen bleibt, abgesehen vom Verbrennen von *grünem Wasserstoff*, nur der Einsatz von *grünem Strom* übrig. Dieser kann aus einer Batterie kommen, mit Wasserstoff aus einer Brennstoffzelle erzeugt werden oder aus einer Leitung entnommen werden. Diese Leitung kann oberirdisch aufgeständert entlang der Fahrbahn geführt werden, wie das im elektrischen Verkehr bei Eisenbahnen weltweit gemacht wird, oder sie könnte im Boden verlegt werden und den Strom konduktiv oder induktiv auf die darüber hinwegfahrenden Fahrzeuge übertragen.

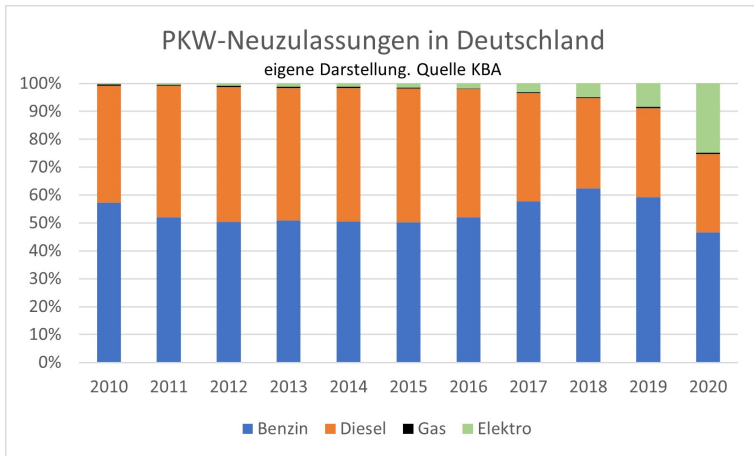


Abbildung 1.6: PKW-Neuzulassungen in Deutschland nach Antriebsart

Alternative Antriebe sind bei LKW bis ins Jahr 2024 hinein nur in sehr geringen Stückzahlen vertreten. Die in Abb. 1.7 gezeigten, mit Gas betriebenen, sind nach dem Wegfall der Steuerbefreiung und seit dem Krieg um die Ukraine weitestgehend aus dem Einsatz genommen worden, und überhaupt kann der Einsatz von fossilem Gas nicht als klimaneutral bezeichnet werden. Der Brennstoffzellenantrieb ist in der angesprochenen Abbildung gar nicht vertreten. Gnann, Wietschel, Kühn et al. (2017) beschreiben dazu Entwicklungshemmnisse, und Schlott (2020, S 6) spricht dem Antrieb durch Brennstoffzellen auf absehbare Zeit auch „nur ein sehr begrenztes Marktpotenzial“ zu.

Bei den mit Traktionsbatterien angetriebenen LKW standen zunächst nur Fahrzeuge bis zu mittleren Gewichtsklassen und mit eingeschränkten Reichweiten zur Verfügung. Daimler Truck hat in der ersten Hälfte 2024 den E Actros 600 vorgestellt, der auch bei voller Auslastung und einem Gesamtgewicht von 40 Tonnen eine Reichweite von bis zu 500 km haben soll. Wenn man von der Frage absieht, wo die Aufladung der Traktionsbatterie dann erfolgen kann, so ist damit doch ein Einstieg in die Klasse der Fernverkehrs-LKW gemacht, wenn auch weitere Reichweitenvorteile mit erhöhten Fahrzeuggewichten einhergehen.

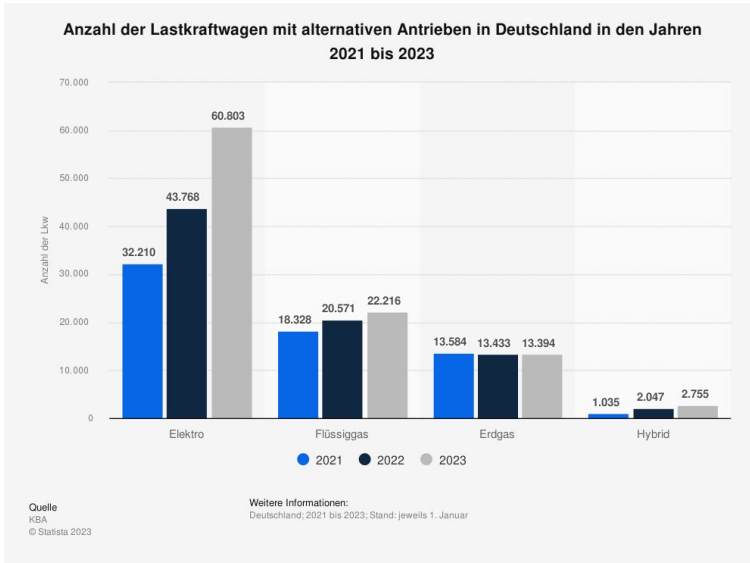


Abbildung 1.7: Anzahl von LKW mit alternativen Antrieben

1.2 Fragestellung

Wenn, wie im vorhergehenden Abschnitt ausgeführt, Gas-LKW ausscheiden, Brennstoffzellenantrieb noch lange nicht zur Verfügung steht und Batterie-LKW hinsichtlich Reichweite und Fahrzeuggewicht gravierende Nachteile haben, dann rückt der elektrische Antrieb mit Strom aus einer Leitung in den Fokus, konkret das System eHighway, das im folgenden Kapitel beschrieben wird. Es muss die Frage beantwortet werden, ob der eHighway für den Güterkraftverkehr in Deutschland einen wirksamen und bezahlbaren Beitrag zur CO₂-Reduktion leisten kann.

Jenseits der technischen Beschreibung wird es in der vorliegenden Arbeit vor allem darum gehen, Einsatzmöglichkeiten zu identifizieren, in denen das System eHighway mögliche Vorteile einsetzen kann und umgekehrt Betriebsmodelle zu suchen, die sich für das System eHighway besonders eignen. Die Eignung wird dabei anhand von drei Qualitätsmerkmalen überprüft:

- CO_2 -Ausstoß SSA
- Systemkosten C_{sys}
- Frachterlöse FE

Die nach den Formeln im Kapitel 4 ermittelten Werte werden nach dem von Siebertz et al. (2017) beschriebenen Versuchsaufbau miteinander verglichen:

Für gleichartige Betriebsmodelle, z.B. Modelle mit Trampverkehr, werden in den Berechnungsläufen die Parameter variiert und die Ergebnisse innerhalb des Trampverkehrs verglichen.

Für unterschiedliche Betriebsmodelle, z.B. Trampverkehr und Traktionsverkehr, werden gleiche Parameter verwendet und die Ergebnisse für Trampverkehr mit denen für Traktionsverkehr verglichen.

Im Abschnitt 2.5 wird untersucht, ob und welche Autobahnabschnitte es gibt, auf denen, mit Blick auf die beschriebenen Qualitätsmerkmale, die Einrichtung eines eHighway lohnt. Dazu werden mehr als 900 Transportbeispiele mit rund 300.000 Transportkilometern ausgewertet. Auf dem deutschen Autobahnnetz werden dazu verschiedene Teilstrecken als eWay gekennzeichnet und es werden die folgenden Fragen untersucht:

- Welche Autobahnabschnitte versprechen unter Kostenabschätzung den größten Erfolg und würden als erste elektrifiziert werden?
- Werden unterschiedliche Fahrtrichtungen einer Strecke unterschiedlich stark befahren?
- Wie groß sind die durchschnittlichen Entfernungen aus den 2-stelligen PLZ-Gebieten bis zur nächsten eWay-Strecke?

1.3 Zielsetzung

Gesucht wird ein Betriebsmodell, in dem der eHighway integriert ist und das im Vergleich zum Referenzmodell und anderen Modellen folgenden Forderungen genügt:

- Messbare CO₂-Einsparung
- mindestens gleiche Erlöse auf Seiten der Fuhrparkbetreiber
- niedrigere oder zumindest gleiche Systemkosten

Gesucht werden ferner:

- Autobahnteilstücke, die sich zum Ausbau als eHighway eignen und auf denen ein solches Modell realisiert werden kann
- der HO-LKW, der die oben genannten Ziele am besten erfüllt
- das Betriebsmodell der Spedition, in dem das System eHighway die größten Vorteile zeigt

1.4 Definitionen

In den folgenden Abschnitten werden Herleitung, Bedeutung und Wirkung diverser in dieser Arbeit verwendeter Begriffe erläutert und präzisiert.

1.4.1 eWay

Die Elektrifizierung von Straßenfahrzeugen mittels einer Oberleitung ist seit Langem bekannt, wurde aber immer nur auf örtlich begrenzten Strecken eingesetzt. In großen Grubenbetrieben wurden beispielsweise Muldenkipper angetrieben, oder innerhalb von Städten die sogenannten O-Busse. Autobahnen und Bundesstraßen,

die mit Oberleitungen elektrifiziert sind, werden im allgemeinen Sprachgebrauch als *E-Highway*, *eHighway*, *E-way*, *Eway* oder *eWay* bezeichnet. Diese Namen leiten sich ab von dem Projekt, das im Los Angeles County (USA) die Häfen in Long Beach mit den Güterverteilzentren verbindet. Dort werden aber auch die Begriffe *electric trucks* und *trucks under overhead lines* verwendet. Die dort eingesetzten LKW werden in deutschen Forschungsberichten als Oberleitungs-LKW bezeichnet. Diverse Abkürzungen verwenden den Begriff OH-LKW. In den folgenden Kapiteln dieser Arbeit wird der Name *eWay* sowohl für das Verkehrssystem als auch für die eigentliche elektrifizierte Trasse benutzt. Außerdem werden die Begriffe *HO-LKW*, *HO-SZM* für die darauf verkehrenden mit Elektroantrieb und Stromabnehmer ausgerüsteten LKW verwendet, wobei *H* für Hybrid und *O* für Oberleitung steht (Gnann, 2017).

1.4.2 Hybride Antriebe

Lastzüge müssen in jedem Streckenabschnitt und allen Fahrsituationen so mit Energie versorgt sein, wie das heute mit den Dieselmotoren der Fall ist. Verlassen die HO-Fahrzeuge die elektrifizierten Streckenabschnitte, dann muss die Energiezufuhr aus einer anderen, einer hybriden Quelle erfolgen. Die aus dem Lateinischen stammende Bezeichnung *hybrid* bedeutet *gemischt* und leitet sich aus der Tatsache ab, dass zumindest zwei Energielieferanten eingesetzt werden.

Für die HO-Fahrzeuge auf dem eWay sind für den Antrieb folgende hybride Energiequellen prinzipiell möglich:

- Verbrennungsmotor für Diesel
- Verbrennungsmotor für Gas
- Verbrennungsmotor für Synthetische Treibstoffe
- Verbrennungsmotor für Wasserstoff

- Brennstoffzelle für Wasserstoff
- Traktionsbatterie

Der **Index *hyb*** wird in Formeln dieser Arbeit als Platzhalter für die beschriebenen hybriden Antriebe parallel zum HO-Antrieb verwendet. Im HO-Betrieb also der Index *ho* kombiniert mit *die* für hybriden Dieselantrieb, mit *hvo* für hybriden HVO-Dieselantrieb und mit *bat* für hybriden Batterieantrieb. Außerhalb des HO-Betriebs steht der Index *hyb* alleine und ist Platzhalter für den Antrieb, den LKW verwenden, die nicht Teilnehmer am HO-Verkehr sind.

Beispiele:

Zahl HO-Fahrzeuge mit hybridem Antrieb ZF_{hohyb} kann für ZF_{hodie} stehen, wenn die HO-SZM Diesel als hybride Energiequelle nutzen,

Zahl Fahrzeuge, die nicht für HO-Betrieb ausgerüstet sind ZF_{hyb} kann für ZF_{hvo} stehen, wenn diese LKW ausschließlich HVO-Diesel als Energiequelle nutzen.

1.4.3 Sattelzugmaschine SZM

Der Begriff SZM, im Wortsinn Sattelzugmaschine, wird hier, analog zu den meisten Forschungsberichten zum Thema eWay, als Synonym für die schweren Lastzüge im Güterkraftverkehr benutzt. Dabei kann SZM sowohl für Sattelzug, also das Gespann von Sattelzugmaschine mit Sattelaufzieger (Trailer) stehen, als auch für Gliederzüge, ein Gespann aus Lastkraftwagen und Anhänger. Hier als SZM bezeichnete LKW verfügen über ein maximales zGG von 40 Tonnen, sie haben vier oder fünf Achsen und Adolf und Balthasar (2010) beschreibt sie als *Königsklasse* des Straßengüterverkehrs. Für beide Gespanne sind die Höhe der Kfz-Steuer und der Maut identisch. Es bestehen zwar Unterschiede bezüglich der zulässigen Gespannlänge, diese sind für die in dieser Arbeit durchgeführten Berechnungen und Aussagen jedoch ohne Auswirkung.

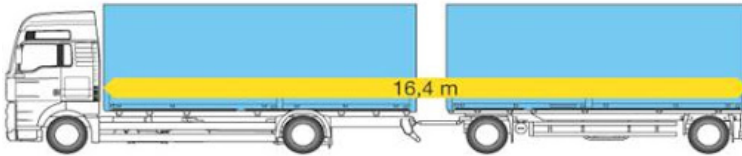


Abbildung 1.8: Gliederzug (www.rollerreiner.de)

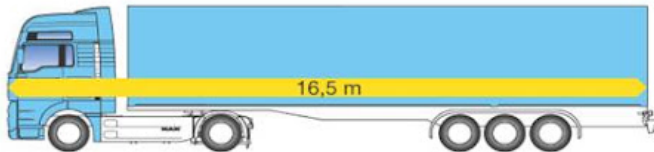


Abbildung 1.9: Sattelzug (www.rollerreiner.de)

Gliederzüge stellten zunächst die Mehrzahl der schweren LKW in Deutschland dar, entweder wie in Abb. 1.8 mit vier Achsen dargestellt, oder mit fünf Achsen, wenn entweder LKW oder Anhänger als Dreiachsler ausgeführt sind. Ab Mitte der 1990er Jahre wurden Gliederzüge immer mehr durch Sattelzüge, wie in Abb. 1.9 dargestellt, verdrängt, obwohl deren Sattelaufleger eine zwei Meter kürzere Ladefläche haben. Gliederzüge werden, in der Kombination Dreiachsmotorwagen mit Zweiaxsanhänger, im Fernverkehr heute überwiegend im Systemverkehr zum

Transport von Wechselbrücken eingesetzt. Für die Sattelzüge sprechen im Wesentlichen drei Vorteile:

1. Das zeitaufwändige Abhängen und Wiederanhängen vor und nach einer Be- oder Entladung entfällt.
2. Sie belegen im Gegensatz zu den Gliederzügen nur 1 Rampenplatz.
3. Frachstücke mit einer Länge von mehr als 8 Metern müssen in der Regel ohnehin auf Sattelaufleger verladen werden.

1.4.4 Referenzmodell

Damit im weiteren Verlauf dieser Arbeit Änderungen beim CO₂-Ausstoß oder den Systemkosten ermittelt werden können, muss zunächst eine Referenzgröße definiert werden, auf die sich die neuen Werte beziehen. Kühnel et al. (2018, S.31-32) beschreibt ein solches Referenzfahrzeug, bezogen auf Daten des Jahres 2015.

Generell unterliegen die SZM, mit einigen sehr kleinen Ausnahmen, dem Güterkraftverkehrsgesetz (GüKG) und sind damit entweder dem *gewerblichen Güterkraftverkehr* oder dem *Werkverkehr* zuzuordnen. Sie können bezüglich ihrer technischen Daten komplett identisch sein und unterscheiden sich bezüglich ihres Einsatzes nicht gravierend. Auf diese, in Deutschland angemeldeten 183.000 SZM, entfallen 48% der CO₂-Emissionen des innerdeutschen LKW-Verkehrs. Laut Wietschel, Gnann et al. (2017) entfallen auf die nächstniedrigere Gewichtsklasse (12-26 t zGG) 23% der CO₂-Emissionen. Anders als die Klasse der SZM, werden diese Fahrzeuge aber zu einem Großteil im Regional- oder Nahverkehr eingesetzt und werden elektrifizierte Autobahnabschnitte demnach nur zu einem geringeren Anteil nutzen können.

In umfangreichen Untersuchungen hat man sich daher nur auf die Klasse der SZM beschränkt und untersucht, welches Potenzial zur CO₂-Minderung darin zu finden ist.

Zusammengefasst, die Vorzüge dieser Referenzfahrzeuge:

- Motorentechnologie vorhanden und langjährig erprobt
- Vielzahl unterschiedlich starker Motoren wählbar
- Dichtes Netz von Tankstellen und Reparaturwerkstätten
- Weitgehend standardisiertes System

Trotz dieser Vorzüge muss festgehalten werden, dass ab 2035 das *Verbrenner* aus Kraft tritt und der Dieselmotor in neuen LKW nicht mehr eingebaut werden darf, auch nicht als Bestandteil von hybriden Antrieben.

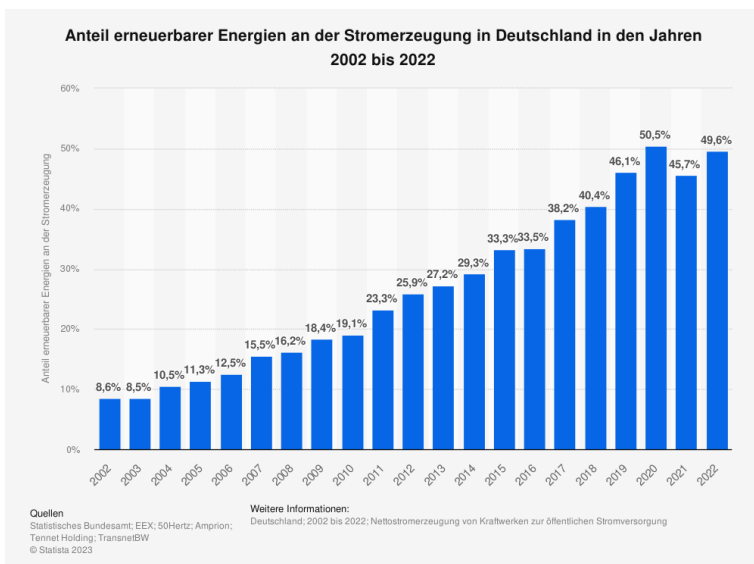


Abbildung 1.10: Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung

1.4.5 Der Grüne Strom

Wenn im Zuge der Dekarbonisierung zukünftig Strom unsere PKW und LKW antreiben soll, dann darf dieser Strom nicht mehr aus fossilen Quellen erzeugt werden. Diese waren in der Vergangenheit aber die wesentlichen Primärenergie-lieferanten: **Braunkohle** war, in beiden Teilen des heute vereinten Deutschlands, ausreichend vorhanden und in den Lagerstätten des Rheinischen Beckens und in der Lausitz im Tagebau leicht zugänglich. **Steinkohle** wurde in Westdeutschland vor allem in den Kohlelagern des Ruhrgebiets und im Saarland abgebaut und wird nach deren Schließung heute über die Nordseehäfen importiert. **Gas** kam über viele Jahrzehnte durch diverse Pipelines, wie die inzwischen zerstörte *Nord Stream 2*, zu uns. Diese kostengünstigen Importe müssen, seit Beginn des Ukrainekriegs im Februar 2022 und nach dem Abbruch der Handelsbeziehungen zu Russland, derzeit aus anderen Quellen ersetzt werden, vor allem durch Flüssiggas aus den USA, aus Norwegen und aus arabischen Staaten am Persischen Golf. Kohle und Gas konnten, zusammen mit den Atomkraftwerken, den immer größeren Strombedarf Deutschlands zuverlässig decken. Da Deutschland im Jahr 2023 die letzten drei Atomkraftwerke abgestellt hat und im Zuge des Kohleausstiegs bis 2040 auch alle Kohlekraftwerke vom Netz nehmen will, muss der in Deutschland produzierte Strom dann aus Wind, Sonne, Wasser und Biogas stammen. Abb. 1.10 zeigt den drastischen Anstieg der erneuerbaren Energien bei der Erzeugung dieses Grünen Stroms, bei dessen Einsatz kein CO₂-Ausstoß verursacht wird, und Tabelle 1.1 zeigt, dass der Wegfall der Atomkraftwerke durch den Ausbau von Windkraft-, Wasserkraft- und Photovoltaikanlagen im Durchschnitt annähernd vollständig kompensiert werden konnte. Unabhängig vom rasanten Ausbau der Stromproduktion aus erneuerbaren Energien in Deutschland bleibt die Diskussion um die Grundlastabdeckung. Wenn nachts kein Strom aus den Solarmodulen kommt oder diese tagsüber beschattet oder mit Schnee bedeckt sind und die Windräder stillstehen, weil kein Wind weht, was unter dem Begriff *Dunkelflaute* zusammengefasst wird, dann muss *Grüner Strom* aus anderen Quellen zur Verfügung stehen. In jedem Fall müssen Stromnetze gebaut werden, die in der Lage sind, den Strom dorthin zu bringen, wo er benötigt wird. Mit *Suedlink* ist

Tabelle 1.1: Kompensation bei der Stromerzeugung nach Wegfall der Kernenergie

Im Inland produzierte und ins Netz eingespeiste Strommenge					
	3. Quartal 2022 [Mrd. kWh]	Anteile [%]	3. Quartal 2023 [Mrd. kWh]	Anteile [%]	Veränderung zum 3. Quartal 2022
Netzeinspeisung insgesamt	118.20	100.00	94.20	100.00	-20.30%
Konventionelle Energieträger	65.70	55.60	37.50	39.80	-42.90%
darunter:					
Kohle	42.70	36.20	22.50	23.90	-47.30%
Kernenergie	8.70	7.40	0.00	0.00	-100.00%
Erdgas	11.00	9.30	12.00	12.70	9.20%
Erneuerbare Energieträger	52.50	44.40	56.70	60.20	8.10%
darunter:					
Windkraft	19.80	16.80	23.00	24.40	16.20%
Biogas	7.20	6.10	6.50	6.90	-9.00%
Photovoltaik	19.00	16.10	20.20	21.50	6.60%
Wasserkraft	3.50	2.90	4.10	4.40	18.80%

Quelle: DSTATIS Statistisches Bundesamt

jetzt der Baubeginn für eine solche 700 km lange Trasse erfolgt. Abb. 1.11 zeigt deren Verlauf von Brunsbüttel nach Leingarten-Großgartach bei Heilbronn.

Woher immer auch der Strom kommen wird, die HO-LKW würden jedenfalls zu einer erheblichen Steigerung der Stromnachfrage führen. Laut Wietschel, Gnann et al., 2017 werden 60.000 HO-LKW ca. 8 TWh jährlich verbrauchen, die angestrebten 250.000 HO-LKW würden 36 TWh zusätzlich benötigen. Bezogen auf den für 2030 prognostizierten Gesamtstrombedarf würde das einer Steigerung von 1,3 bis 1,6% bedeuten, beziehungsweise von 7%, wenn tatsächlich 250.000 HO-LKW unterwegs wären. Diese Prozentzahlen beziehen sich auf eine Stromnachfrage von 501 TWh bzw. 593 TWh. Die Abb. 1.12 der Prognos AG für das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aus dem Jahr 2021 sagt für 2030

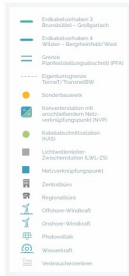
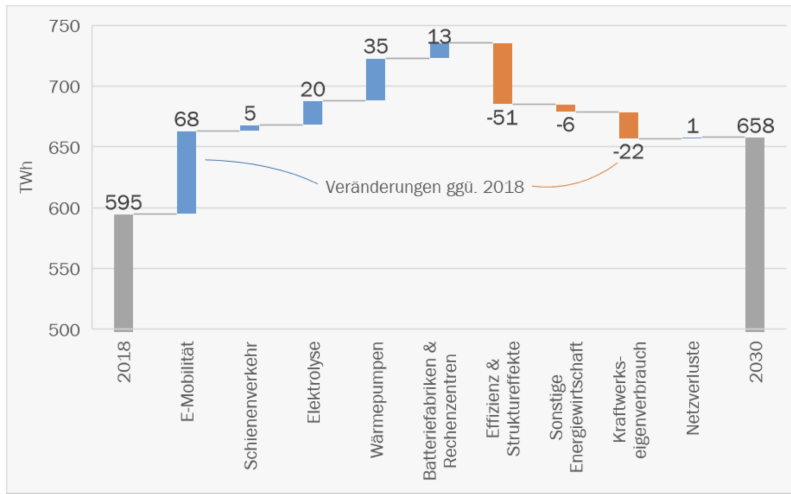


Abbildung 1.11: Stromtrasse Suedlink (Quelle: www.suedlink.com)

mit 658 TWh eine deutlich höhere Nachfrage voraus und sieht in der Elektromobilität den Sektor mit der größten Nachfrageänderung.

1.4.6 Der Grüne Wasserstoff

Wasserstoff (H_2) ist das am häufigsten vorkommende Element in unserem Universum. Es ist ein farb-, geruch- und geschmackloses Gas und kommt in der Natur nur gebunden vor, vor allem im Wasser (H_2O) und damit natürlich auch in dem in der Atmosphäre befindlichen Wasserdampf. Methan (CH_4), wichtigster Bestandteil des Erdgases, und Erdöl sind weitere Wasserstoffverbindungen, und auch in jeglicher Biomasse ist H_2 enthalten. Er lässt sich transportieren und speichern und hat als komprimierter Wasserstoff mit 33 kWh/kg die rund dreifache Energiedichte von Diesel. Neben seiner Verwendung als Rohstoff bei vielen chemischen Prozessen verbinden sich mit ihm große Hoffnungen bei der Dekarbonisierung industrieller Produktionsprozesse und des Verkehrs.



E-Mobilität umfasst E-Pkw sowie leichte und schwere Nutzfahrzeuge. Wärmepumpen ohne kleine Warmwasser-Wärmepumpen.

Quelle: Prognos, Öko-Institut, Fraunhofer ISI, 2021

Abbildung 1.12: Stromnachfrage 2030 im Vergleich zu 2018 Quelle: Prognos AG)

Laut Thomann et al. (2022) ist Grüner Wasserstoff gemäß der nationalen Wasserstoffstrategie (NWS) dadurch charakterisiert, dass er durch Elektrolyse von Wasser mit Strom aus erneuerbaren Energien (EE) hergestellt wird. In derselben Quelle wird von *Farben von Wasserstoff* gesprochen, von denen hier nur einige Produktionsverfahren aufgezählt werden:

- **Grüner Wasserstoff:**
Elektrolyse (Trennung) von Wasser (H_2O) zu H_2 und O_2 . Meerwasser muss dabei zuvor entsalzt werden.
- **Grauer Wasserstoff:**
Aufspaltung von Erdgas unter Entstehung von Kohlendioxid und dessen Freisetzung in die Atmosphäre.

- Blauer Wasserstoff:
Aufspaltung von fossilen Energieträgern unter Entstehung von Kohlendioxid und dessen Lagerung.

Im Hinblick auf Dekarbonisierung zählt nur der Grüne Wasserstoff, der mit Grünem Strom erzeugt wird. Wie Pfennig et al. (2021) im PtX-Atlas beschreiben, kommt ihm überall dort große Bedeutung zu, wo die direkte Nutzung von Grünem Strom nicht unmittelbar möglich ist. Beispiele sind:

- Ersatz von Kohle in Stahlwerken
- Ersatz von Diesel oder Schweröl durch synthetische Kraftstoffe in der Schifffahrt
- Ersatz von Kohle oder fossilem Gas durch Wasserstoff oder von synthetischem Erdgas in Ausgleichskraftwerken für die Stromerzeugung

Der PtX-Atlas sieht in Deutschland, wie im übrigen Europa, nicht die großen Potentiale zur Herstellung von Wasserstoff. Die Autoren des PtX-Atlas sehen die günstigsten Produktionskosten für Grünen Wasserstoff bei den sogenannten Wind-Standorten Chile und Argentinien, gefolgt von Venezuela und Mauretanien, wo günstige Bedingungen für Wind und Sonne herrschen. In jedem Fall werden lange Distanzen zu überbrücken sein, wenn von dort der Wasserstoff nach Deutschland kommen soll. Würde er nicht vor Ort zur Herstellung der Energieträger Ammoniak oder Synfuels verwendet werden, müsste er vor dem Transport in Schiffen unter hohem Energie- und Geldaufwand verflüssigt und vor dem Einspeisen ins deutsche Netz wieder gasförmig gemacht werden. Das trifft in gleicher Weise auf Wasserstoff zu, wenn dieser statt Strom als Energieträger aus fernen Produktionsstandorten nach Europa transportiert werden soll. Das Deutsche Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR) geht davon aus, dass bei der Umwandlung von Solarstrom in Wasserstoff und bei dessen Rückumwandlung in Strom bis zu dessen Netzeinspeisung 50% der ursprünglich eingesetzten Energie verloren gehen würden. Hinzu kämen die Pumpverluste beim Transport.

Die beschriebenen Hemmnisse begründen, weshalb Brennstoffzellen derzeit nicht als führende Antriebstechnik zur Verfügung stehen werden. Dennoch darf laut Kruse und Wedemeier (2021) davon ausgegangen werden, dass Wasserstoff mit einer Brennstoffzelle sich für schwere Fahrzeuge auf lange Distanzen als Antriebstechnologie durchsetzen wird. Dies träfe dann laut Wietschel, Gnann et al. (2017) auf rund 230.000 LKW der Gewichtsklasse 18 bis 44 Tonnen zu. Gemäß derselben Quelle ist der Wasserstoffpreis entscheidend für den Anteil von SZM mit Brennstoffzellenantrieb (FCEV). Bei einem Preis von 8,30 €/kg wird der Bestand im Jahr 2030 auf nahe Null eingeschätzt, bei 5,00 €/kg auf 60.000 FCEV. Sobald der Brennstoffzellenantrieb serienreif zur Verfügung steht, könnten HO-Fahrzeuge als hybriden Antrieb diese Technik nutzen. Sie wären bei ausreichend dichtem H₂-Tankstellennetz gar nicht auf das Oberleitungsnetz angewiesen, könnten dieses aber immer dann nutzen, wenn solche Strecken entlang der geplanten Route zu finden sind. Gnann, Burghard et al. (2021) verweisen im Stakeholder-Dialog allerdings auf viele Entwicklungshemmnisse.

Den aus 2019 und 2021 stammenden Vermutungen von Lechtenböhrer et al. (2019) und von Kruse und Wedemeier (2021), wonach für den Wasserstofftransport in Deutschland das Erdgasnetz verwendet werden könnte, wurde von Professor Pinkwart, Mitglied im Nationalen Wasserstoffrat der Bundesregierung, anlässlich eines Vortrags am 04.10.2023 am Fraunhofer Institut in Pfinztal, eine klare Absage erteilt. Zwar wären die Stahlröhren durchaus für den Durchfluss von Wasserstoff geeignet, das träfe aber nicht auf Ventile, Druckminderer und ähnliche Bestandteile des Leitungsnetzes zu.

Die Deutsche Presse Agentur (dpa) meldet am 26.07.2024, dass von Daimler Truck die ersten Prototypen mit Brennstoffzellenantrieb an ausgewählte Fuhrparkbetreiber ausgeliefert werden, um im Echteinsatz getestet zu werden. Die Wasserstofftanks sollen eine Reichweite von bis 1.000 km zulassen. Diese Meldung zeigt, dass auf der Fuhrparkseite die größten Entwicklungsschritte gemacht worden sind. Hyundai hat in der Schweiz bereits Solo-LKW mit Brennstoffzellen im Einsatz. Tatsächlich ist derzeit die Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff begrenzt, auch noch mittelfristig, da die vorhandenen Mengen eher für industrielle

Verfahren reserviert werden, für deren klimaneutralen Umbau es keinen anderen Weg gibt. In Beutler (2021, S 7) ist dazu zu lesen: „Allerdings ist grüner Wasserstoff derzeit noch ein Zukunftsprojekt und de facto nicht verfügbar.“

1.4.7 HVO-Diesel

HVO-Diesel (Hydrotreated Vegetable Oil) kann in Reinform (HVO100) eine CO₂-Minderung von 90% gegenüber herkömmlichem Diesel darstellen. Interessant ist in diesem Zusammenhang die Argumentation, dass auch der *Grüne Strom* keine CO₂-Reduktion von 100% garantieren kann, zumindest nicht bei den gegebenen Bedingungen in Deutschland (Dr. Toedter, Institut für Kolbenmaschinen, KIT Karlsruhe im Gespräch am 06.05.2024). Demnach wird aus Deutschland, an Tagen mit großem Stromertrag aus Wind und Photovoltaik, Strom in das europäische Netz exportiert und an Tagen mit Dunkelflaute von dort Strom importiert, der zumindest teilweise nicht das Prädikat *Grün* verdient.

Das Fraunhofer-Institut ISI hat schon im Jahr 2017 in Gnnann (2017, S 22) festgestellt, dass synthetische, strombasierte Treibstoffe als hybride Antriebsquelle für die HO-SZM denkbar wären, als Ersatz für den hybriden Batterieantrieb.

Laut Beschluss des BMDV vom 10.04.2024 darf jedenfalls HVO-Diesel ab sofort auch an öffentlichen Tankstellen verkauft werden. Da HVO aus organischen Abfallstoffen hergestellt wird, oder aus Abfallstoffen, die bei anderen Produktionsprozessen ohnehin anfallen, steht er nicht in Konkurrenz zur Erzeugung von Nahrungsmitteln, wie das bei früherem Biodiesel der Fall war. Die Firma *Neste* aus Finnland, nach eigenen Angaben (www.neste.com) der weltweit größte Produzent von HVO, sagt voraus, dass bis zum Jahr 2040 ungefähr 40% des weltweiten Energiebedarfs für Mobilität mit solchen Treibstoffen abgedeckt werden kann.

Am 02.05.2024 wurde, im Beisein von CSU-Generalsekretär Huber, in der BK-Tankstelle Baaderstraße 6 erstmalig in München HVO100 angeboten und dessen Preis lag nur 7 Eurocent über dem Preis für Diesel (siehe Abb. 1.13). Damit eröffnet sich eine kostengünstige Möglichkeit der CO₂-Reduzierung ohne Wechsel

von Fahrzeugen oder Tankstellennetz, allerdings gibt es dazu aus dem Kreis von Speditoren die folgenden widersprüchlichen Meldungen:

- Ein deutscher Spediteur, der für mehrere Automobilwerke Rundläufe fährt, teilt auf Anfrage mit, dass zumindest AUDI einen Nachweis verlangt von wem der HVO100-Diesel bezogen wird. Im Falle dieses Speditors sind die Preise bei den zwei zugelassenen Lieferanten um 20 bis 25 Eurocent je Liter höher, als die Preise für fossilen Diesel.
- Ein schwedischer Spediteur unterhält eine Abteilung, die den Kunden Transporte mit Fahrzeugen anbietet, welche ausschließlich mit erneuerbaren Energien angetrieben werden. Diese Firma unterhält keine eigene Betriebstankstelle, da die Fahrzeuge auf der Langstrecke und auf internationalen Routen unterwegs sind. Nach dessen Angaben tanken die Fahrer unterwegs HVO100, wo immer sie diesen an Tankstellen finden.



Abbildung 1.13: Tankstellenpreis am 27.05.2024 für AdBlue und HVO100

Auch bei der Verbrennung von HVO-Diesel muss AdBlue zugesetzt werden. Bezogen auf die in Abb. 1.13 genannten Tankstellenpreise liegt der Preis für

AdBlue bei ungefähr 70% des Dieselpreises. Trotz dieses hohen Anteils machen die AdBlue-Kosten nur rund 3% der Dieselskosten aus, da man laut Wietschel, Gnann et al. (2017, S 79) mit einem AdBlue-Verbrauch von 3% bis 5% des Dieselsverbrauchs rechnet.

2 Der eHighway

Das von Siemens Mobility GmbH seit 2010 entwickelte System, das auf mehreren Teststrecken im Ausland im Einsatz war und im Oktober 2024 in Deutschland noch immer ist, zeigt die Abb. 2.1 mit den drei wesentlichen Bestandteilen:

- LKW mit Pantograf
- Autobahn mit Oberleitung
- Unterwerk am Rande der Autobahn



Abbildung 2.1: Das System eHighway (nach Siemens Mobility)

Der LKW entnimmt über den mit zwei Gleitschuhen ausgestatteten Pantografen Gleichstrom aus einer Oberleitung, treibt damit seinen Elektromotor an und lädt bei Stromüberschuss seine Traktionsbatterie. Aus dieser oder aus einer zweiten

Antriebsquelle (der hybride Antrieb) versorgt er sich, wenn er die Oberleitungsstrecke verlässt.

Die Oberleitung verläuft aufgeständert über der jeweils rechten Fahrspur und besteht aus zwei Fahrdrähten, da der Strom, anders als bei der Eisenbahn, nicht über die Schienen abgeleitet werden kann.

Das Unterwerk umfasst den Transformator zur Reduzierung der Stromspannung aus dem Mittelspannungsnetz, den Gleichrichter zur Umwandlung von Wechselstrom in Gleichstrom, die Zu- und Ableitungen sowie die Steuerungstechnik.

Das System ist, obwohl die dabei verwendete Technik im Eisenbahnverkehr seit Jahrzehnten im Einsatz ist, erst seit wenigen Jahren Gegenstand der Forschung und Entwicklung. In Büchern finden sich vor 2016 dazu keine verwertbaren Informationen, sodass sich diese Arbeit vor allem auf drei Arten von Quellen stützt:

1. In Siemens (2012) und Siemens (2016a) wird zum Beispiel mit ENUBA und ENUBA II das System beschrieben, vor allem dessen Technik.
2. Zahlreiche Forschungsberichte beleuchten das Thema im Auftrag verschiedener Bundesministerien, wobei vor allem 3 Institute herausstechen:
 - Fraunhofer ISI, Karlsruhe
 - Öko-Institut e.V., Berlin
 - ifeu gGmbH Institut für Energie und Umweltforschung, Heidelberg
3. Veröffentlichungen von Firmen und Verbänden aus dem Bereich Fahrzeugtechnik

Die beiden unter Ziffer 1 genannten Berichte stellen vor allem die technische Seite des Systems in den Vordergrund. Deren Beurteilung ist nicht Gegenstand dieser Arbeit. Die Berichte aus Ziffer 2, beispielhaft Hacker, Jöhrens et al. (2020) und Jöhrens et al. (2020), beleuchten den Sachverhalt zudem aus vielfältigen Perspektiven, wie Akzeptanz bei Stakeholdern und Öffentlichkeit, Bedingungen

während des Markthochlaufs, internationale Einbindung und Ähnliches. Berichte aus Ziffer 3 spiegeln insbesondere die Sicht von Spediteurseite und deren Interessenvertretungen wider und beleuchten Randbedingungen wie Auswirkung auf Fahrpersonal und die Situationen auf Rastplätzen und Autohöfen.

Die im Anhang abgelegten Tabellen A.1 und A.2 zur durchgeführten Literaturrecherche nennen die Quellen, aus denen Antworten zu den in Abschnitt 1.2 aufgestellten Fragen abgeleitet werden konnten.

Die in dieser Arbeit durchgeführten Berechnungen beziehen sich immer auf das Einsatzgebiet Deutschland. Allerdings spricht man in Wietschel, Burghard et al. (2020) dem System eWay nur dann Erfolgchancen zu, wenn es europaweit eingeführt wird, am besten unter Federführung der Europäischen Union (EU).

Ob das System eHighway trotz der offenkundigen Vorteile

hoher Wirkungsgrad des Elektroantriebs mit Möglichkeit der Rekuperation,
Eignung für Langstreckenbetrieb

sich gegen andere Antriebskonzepte durchsetzen können, sollen die Untersuchungen dieser Arbeit zeigen. Zunächst folgt in den nächsten Abschnitten eine Beschreibung seiner Hauptbestandteile.

2.1 Trasse

Der Begriff *Trasse* bezieht sich in dieser Arbeit auf Straßen, vor allem Autobahnen, die mittels einer Oberleitung für das System eHigway ausgerüstet worden sind. Er beinhaltet demnach die Infrastruktur zur Stromversorgung, zumindest ab dem Mittelspannungsnetz, über die an der Strecke entlang gebauten Unterwerke hin zu den aufgeständerten Oberleitungen. Im Zusammenhang mit diesen Leitungen werden mit Blick auf die Akzeptanz des Systems eHigway folgende Nachteile angeführt:

- Im Winter kann sich unter bestimmten Witterungsbedingungen Eis bilden und auf die Fahrzeuge herabfallen.
- Im Falle von Verkehrsunfällen können Rettungshelikopter nicht oder nur eingeschränkt in der Nähe der Unfallstelle auf der Fahrbahn landen.

Die technischen und elektrotechnischen Voraussetzungen des Systems eHighway wurden von Siemens mobility in den Arbeiten Siemens (2012), Siemens (2016b) und Siemens (2020) detailliert beschrieben und werden hier als gültig angenommen. In vielen Forschungsberichten des Fraunhoferinstituts ISI, des Öko-Instituts Berlin und des ifeu-Instituts Heidelberg wird hierauf Bezug genommen. In Wietschel, Gnann et al. (2017) wird der CO₂-Fußabdruck der Trasse als vernachlässigbar bezeichnet. Die eigenen Berechnungen, allerdings mit den dort verwendeten Parametern für die einzelnen Bauteile, kamen mit einem Wert von ungefähr 10 Tonnen CO₂-Ausstoß je Kilometer beidseitig elektrifizierter HO-Strecke zum annähernd identischen Ergebnis. In derselben Quelle wird auf Seite 182 die Lebensdauer der Komponenten mit 6 bis 40 Jahren angegeben. Die eigenen Kostenrechnungen verwenden bezüglich Abschreibung immer einen einzigen Wert für die Trasse insgesamt. Die Baukosten der eWay-Trasse stammen aus Wietschel, Gnann et al. (2017) und beziehen sich auf die Ausbaustufe 4 mit einer Länge von 4.000 km. Plötz, Gnann et al. (2018, S 9) verweisen darauf, dass mit zunehmender Teilnehmerzahl am HO-Verkehr die Auslegung des Stromnetzes angepasst werden muss und entsprechend teurer wird.

Wo in Deutschland der Bau solcher Trassen sinnvoll erscheint, wird im Abschnitt 2.5 behandelt.

2.2 Fahrzeuge

Übereinstimmend wird in den Forschungsberichten davon ausgegangen, dass kleinere LKW, die zudem vorwiegend im Nahverkehr unterwegs sind, nicht als HO-Fahrzeug ausgerüstet werden. Die Gründe liegen im ungünstigen Verhältnis von

Eigengewicht und zusätzlichem Gewicht durch die HO-Komponenten und damit der Verringerung der Nutzlast und des Nutzvolumens, in der meist geringen Bauhöhe der Fahrerhäuser und vor allem im bevorzugten Einsatzgebiet, das mit Traktionsbatterien abgedeckt werden kann. Der Fokus liegt also auf der Fraktion der Gewichtsklasse größer 12 Tonnen zGG und vor allem der Gespanne mit 40 Tonnen zGG. Damit wird es in der Hauptsache um die SZM gehen, ähnlich wie diese auf den Teststrecken eingesetzt sind.



Abbildung 2.2: HO-SZM schematisch (aus Bühs.2023)

Die im Abschnitt 1.4.4 beschriebenen Sattel- und Gliederzüge der oberen Gewichtsklassen bilden die gebräuchlichsten Fahrzeugkombinationen im Güterkraftverkehr auf der Langstrecke. Wie diese als HO-Fahrzeuge aussehen können, zeigt Abb. 2.3 am Beispiel einer Zugmaschine von Scania, die einen Standardsattelanhänger ziehen kann, dessen Abmessungen Abb. 2.4 zeigt.

Eine Schemaskizze von Siemens mit den wesentlichen Bauteilen der HO-SZM zeigt die Abb. 2.2. Aus Siemens (2012) ENUBA stammt die Abb. 2.5 eines für den HO-Betrieb modifizierten Stromabnehmers, **Pantograf** genannt.



Abbildung 2.3: HO-SZM von Scania

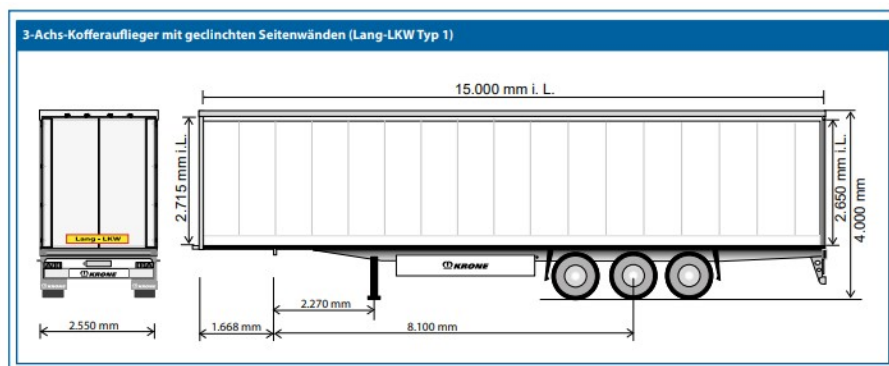


Abbildung 2.4: Standardtrailer der Firma Krone (Quelle: www.krone-trailer.com)

Bei Eisenbahnen oder Straßenbahnen besteht die Oberleitung aus nur einem Fahrdrabt für die Stromzuleitung, weil die Ableitung über das Schienensystem erfolgen kann. Der Stromabnehmer kann damit über die gesamte Breite aus einem Holm bestehen. Beim eWay besteht dagegen der Stromabnehmer aus zwei, im Vergleich zur Schiene, schmälere Holmen. Für eine störungsfreie Stromabnahme müssen beide Gleitstücke an der jeweils zugehörigen Stromleitung anliegen.

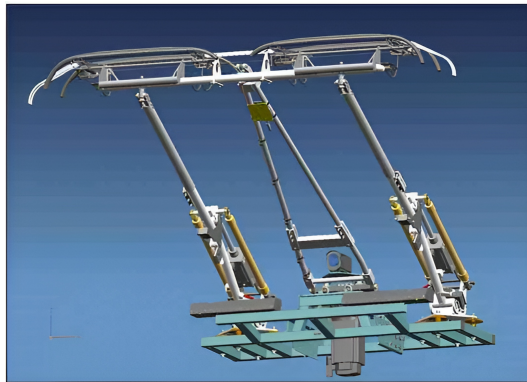


Abbildung 2.5: Pantograf mit 2 Gleitstücken (Quelle: Siemens.2012)

Zu Anfang der Testfahrten auf dem eWayBW berichteten die Fahrer, dass dieses mit einigem Aufwand am Steuer verbunden war. Der Abschlussbericht ENUBA von Siemens (2016b) bestätigt diese Feststellung und hält am Ende des Abschnitts 2.2.2 Stromabnehmer fest, dass „derzeit keine Stromabnehmer-Systeme existieren, die den Anforderungen des dieselelektrischen Betriebs während der Fahrt gerecht werden“. Inzwischen scheint diese Schwachstelle nach Auskunft der Fahrer behoben zu sein, und nach Wirksamwerden des Spurhalteassistenten bei Geschwindigkeiten von über 50 km/h bleibt die Stromversorgung stabil.

Zur Entwicklung der Pantografen und zu den anderen Systemkomponenten finden sich in Bühs (2023) zahlreiche sehr aussagekräftige Darstellungen aus dem Hause Siemens.

Wietschel, Gnann et al. (2017) beziffern die Kosten der jetzt in den Testfahrzeugen eingebauten Pantografen mit 40.000 €. Somit machen diese einen erheblichen Teil der Mehrkosten gegenüber der Standard-Diesel-SZM aus. Bis 2030 rechnet man mit einer Kostendegression auf dann 10.000 €.



Abbildung 2.6: Pantograf mit Basisstation hinter dem Fahrerhaus

Bei den Testfahrzeugen mit hybridem Dieselantrieb sitzt die Basisstation des Pantografen hinter dem Fahrerhaus (Abb. 2.6). Dadurch muss die Sattelkupplung nach hinten rücken und die Gesamtlänge des Gespanns von 16,5 m wird überschritten. Die auf dem eWayBW laufenden Zugmaschinen mussten daher eine Ausnahmegenehmigung erhalten. Am 03.10.2024 wurde, am Rande einer Veranstaltung zum eWayBW, zwischen Mitarbeitern von Scania darüber gesprochen, ob diese Basisstation zukünftig auf dem Fahrerhausdach angebracht werden könnte. Der leitende Techniker hat dies ausgeschlossen, sodass dieses Längenproblem und die daraus folgenden schwierigen Verhältnisse bei der Achslastverteilung als Problem erhalten bleiben. Die Längenüberschreitung würde bei zukünftigen HO-SZM demnach

auch dann noch bestehen, wenn statt des Dieselantriebs eine Traktionsbatterie mit theoretisch 200 km Reichweite mitgeführt wird.

Gleichermaßen ausschlaggebend für Gewicht und Kosten sind die Komponenten der Antriebseinheit, bestehend aus **Elektromotor** und **Batterie**. Bei den batteriegetriebenen SZM verfolgen die Hersteller verschiedene Konzepte für den Einbau des Elektroantriebs: Zentralmotor und Antrieb der Achsen über Kardanwelle oder Einbau des E-Motors direkt an den Rädern.

Bei den Sattelzugmaschinen mit reinem Batterieantrieb kann die Traktionsbatterie zwischen dem Längsrahmen sowie rechts und links davon eingebaut werden und die zulässige Gespannlänge wird eingehalten. Geskes et al. (2020, S 42) berichten über eine Lithium-Ionen-Zelle mit einer Titanoxid-Anode, die modular und skalierbar den unterschiedlichen Leistungsstufen und Reichweiten angepasst werden kann und die folgenden Vorteile aufweist:

- hohe Sicherheit
- hohe Zyklenstabilität und Lebensdauer
- große Lade- und Entladeströme
- hohe Leistungsdichte und damit niedriges Gewicht

Die abschließend genannten „niedrigen Kosten“ wurden allerdings nicht spezifiziert.

In Wietschel, Gnann et al. (2017, S 43) werden dazu folgende Werte genannt:

- Leistungsaufnahme des LKW bei 80 km/h: 120 kW
- Stromverbrauch: 1,5 kWh/km
- Zyklusfestigkeit: 5.000 (ohne Angaben zu SoH)
- Lebensdauer: 1 Mio. Kilometer
- Leistungsdichte: 90 W/kg

- Masse einer Batterie mit 300 kWh: 3.333 kg

An gleicher Stelle werden Überlegungen zu den Fahrzeuggewichten angestellt und für Dieselantrieb folgende Werte angesetzt:

- Dieselmotor 1.000 kg
- Getriebe 500 kg
- gefüllter Tank mit Abgasanlage 1.000 kg

Das Gewicht eines gleichwertigen Elektroantriebs wird mit 750 kg angegeben und das Mehrgewicht des HO-Fahrzeuges mit 1.600 kg. In Wietschel, Gnann et al. (2017, S 83) nennen die Autoren für E-Motoren eine erforderliche Leistung von 200 bis 300 kW. Das entspricht der in 1.4.2 getroffenen Feststellung, wonach hybride Antriebe das Fahrzeug in jeder Fahrsituation zumindest so mit Energie versorgen müssen, wie das mit heutigen Dieselmotoren der Fall ist. Daimler Truck gibt im Datenblatt für den Actros F eine Leistung von 310 kW für den Dieselmotor an. Bei 1.100 Umdrehungen erreicht dieser sein maximales Drehmoment von 2.100 Nm.

Insgesamt wird auf den Seiten 153, 186 und 188, unter Bezugnahme auf ENUBA und die für das Jahr 2030 prognostizierte Zahl der HO-SZM hinsichtlich der Batterien, eine sehr günstige Prognose abgegeben:

Die Kosten werden von 186 auf 140 €/kWh sinken. Die Energiedichten der Speicherbatterien von 150 auf 315 Wh/kg steigen.

Eigene Herleitungen führen in Abb. A.1 zu einem spezifischen Batteriepreis von 420 €/kWh. Dagegen nennt Gnann (2017, S 17) Kosten von 200 €/kWh.

In Kühnel et al. (2018, S 73) wird, auch unter dem Eindruck der Ankündigung von Tesla, schon 2017 einen LKW mit Batterieantrieb und 800 km Reichweite anbieten zu können, die ursprüngliche Auffassung revidiert, wonach Batterie-LKW keine Option für den Fernverkehr darstellen können. Tatsächlich werden

die Fahrzeuge seit Dezember 2024 auch ausgeliefert. Der Mercedes eActros 600 soll zumindest 500 km unter vollständiger Beladung leisten können.

2.3 Ladeinfrastruktur

Generell hängen die Einsatzmöglichkeiten von batterieelektrischen Fahrzeugen von der Kapazität ihrer Batterien ab (siehe vorheriger Abschnitt) und von der Ladetechnik und deren Infrastruktur. Das gilt auch allgemein für LKW und speziell für HO-LKW, wenn als hybrider Antrieb Traktionsbatterien den Verbrennungsmotor ersetzen sollen. Dazu wird in Hagen et al. (2022, S 18 -19) ausgeführt, dass bei Beurteilung der Batterien für HO-SZM „Zyklusstabilität der Zellen das ausschlaggebende Kriterium“ ist. Bei der Ladetechnik unterscheidet man AC-Laden und DC-Laden. Die Abkürzungen stammen aus dem Englischen und stehen für *Alternating Current* (Wechselstrom) und *Direct Current* (Gleichstrom). Da beim AC-Laden der Wechselstrom im Fahrzeug noch auf Gleichstrom transformiert werden muss, sind die Ladelastungen begrenzt und werden für den LKW-Betrieb nicht in Frage kommen. Auch bei den PKW sind mittlerweile die meisten DC-fähig.

Derzeit kann man nach Angaben der EnBW (www.enbw.com) mit folgenden Ladeleistungen rechnen:

- Wechselstrom-Ladestationen 11 bis 22 Kilowatt
- Gleichstrom-Ladestationen 50 bis 125 Kilowatt
- Schnellladestationen 300 bis 350 Kilowatt

Beim Schnellladen unterscheidet man dabei drei Stufen:

- CCS: Das Combined Charging System ist seit rund 11 Jahren in Europa und Nordamerika der Standard.

- HPC: Das High Power Charging verkürzt die Ladezeit des CCS durch Kühlung der Ladeleitung und Ladestecker. Damit wird eine maximale Ladespannung von bis zu 1.000 Volt und ein maximaler Ladestrom von 500 Ampere erreicht. Die Ladeleistung beträgt so bis zu 500 Kilowatt.
- MCS: Das Megawatt Charging System erhöht die maximale Ladespannung auf 1.250 Volt und den maximalen Ladestrom auf bis zu 3.000 Ampere. Damit soll eine Ladeleistung bis rund vier Megawatt erreicht werden. In der ersten Ausbaustufe zur Markteinführung wird mit einem Megawatt Spitzenleistung geladen.

Daimler Truck berichtet am 22.04.2024 von einem Durchbruch bei der Ladetechnik für Elektro-LKW. Demnach sei es gelungen, einen Prototypen des batterieelektrischen eActros 600 mit einer Leistung von 1.000 Kilowatt aufzuladen. Das MCS soll nun zur Serienreife entwickelt werden, damit die Batterien solcher LKW mit einer Ladezeit von 30 Minuten von 20% auf 80% aufgeladen werden können. Tatsächlich würden dann Elektro-LKW auch für den Fernverkehr zur Verfügung stehen, da die anfallenden Ladezeiten mit den vorgeschriebenen Lenkzeitunterbrechungen kompatibel wären und ohne weitere Fahrtzeitunterbrechungen stattfinden könnten. Dieses scheint dem „Elektrotrucker“, der auf YouTube von seinen Fernverkehrsfahrten mit einem Batterie-LKW von IVECO berichtet, heute schon zu gelingen, obwohl er meist nur Ladestationen mit 300 kW nutzt.

Plötz und Jung (2024) berichten in einer Pressemitteilung über eine EU-Verordnung, die Vorgaben macht zum Bau von Ladestationen entlang der europäischen Hauptverkehrswege. Bis 2025 müssen in Deutschland insgesamt 32 LKW-Ladeorte entstehen und bis 2030 sollen alle 60 km Punkte mit Schnellladeinfrastruktur für LKW zur Verfügung stehen. Für den Durchbruch des Elektro-LKW in Deutschland wird das aber nicht ausreichen, viel eher müssten zumindest auf allen Autohöfen entlang deutscher Autobahnen Stromtankstellen entstehen, wie am Beispiel des Ladeparks am Rande der Fabrik von Daimler Truck in Würth auf Abb. 2.7 dargestellt. LKW-Besitzer sind auf diese hohen Ladeleistungen und kurzen Ladezeiten angewiesen. PKW-Besitzern wird in Fasthuber (2020, S 159) die „Reduktion der maximalen Ladeleistung“ zur Vermeidung von Überlastungen der



Abbildung 2.7: E-Ladepark von Daimler Truck und Netze BW

Netzinfrastruktur angeraten. In Bernecker et al. (2020, S 10) wird auf schwedische Pläne verwiesen, wo Ladestationen unter der Regie der schwedischen Verkehrsverwaltung im Verbund von Tankstellenbetreibern und privaten Grundbesitzern aufgebaut werden sollen. In anderen Ländern sieht man ähnliche Modelle, bei denen Privatleute passende Grundstücke an Tankstellen- oder Stromnetzbetreiber vermieten, die auf Basis staatlicher Konzessionen solche Ladeparks betreiben. Abschließend listet man dort, sehr allgemein, drei Möglichkeiten:

- solely public (ausschließlich öffentlich)
- solely privat (ausschließlich privat)
- or public-private-partnerships

Experten der Industrie schätzen, dass bis zum Ende dieses Jahrzehnts rund 50.000 Hochleistungs-Ladepunkte in der EU erforderlich sind, um die steigende Zahl an E-Trucks mit Energie zu versorgen, und Beutler (2021, S 12) beurteilt den Aufbau der Ladeinfrastruktur als den begrenzenden Faktor. Die Süddeutsche Zeitung meldet am 5. Juli 2021, dass die größten LKW-Bauer Europas, die Firmen Daimler Truck, Volvo und Traton (MAN und Scania), ab 2022, nach Gründung eines in Amsterdam ansässigen Gemeinschaftsunternehmens, mindestens 1.700 solcher

Schnellladestationen an Autobahnen oder in der Nähe von Umschlagplätzen errichten werden. Die Umsetzung dieses Vorhabens wollen die drei Unternehmen als „Aufruf zum Handeln an alle anderen Branchenakteure sowie auch an Regierungen und Gesetzgeber“ verstanden wissen, um die „gesetzten Klimaziele gemeinsam mit einem zügigen Ausbau des notwendigen Ladenetzes zu erreichen“. Damit wäre zumindest ein wichtiger Anfang gemacht, denn rund 60% aller LKW auf Europas Straßen stammen von einem der drei Partner. Zwischenzeitlich hat sich das Gemeinschaftsunternehmen den Namen *Milence* gegeben und mietet Flächen entlang der Autobahn an, wo zukünftig Ladeparks entstehen sollen.

In Abraham et al. (2017, S 23) wird auf die verschiedenen Möglichkeiten eingegangen, wie zukünftig das Bezahlen von Ladestrom geregelt werden kann. Besitzer von Elektro-PKW haben heute oft schon mehrere Bezahlkarten an Bord. Die Anmeldung eines Fahrzeuges an der Ladesäule über RFID würden solche Karten überflüssig machen. Für LKW geht man davon aus, dass diese „an der eigenen Steckdose“ laden werden, was zu einem großen Teil stimmt, aber mit wachsender Zahl solcher Fahrzeuge nicht die alleinige Lösung sein kann. Für den Strom aus der Oberleitung müsste sich ein LKW ähnlich anmelden, wie er das mit seiner On Board Unit (OBU) derzeit für die Mautabrechnung macht.

2.4 Teststrecken

Schon 2010 hat die Firma Siemens begonnen, auf einer Versuchsanlage ein System für ganz oder teilweise elektrisch angetriebene LKW zu entwickeln, die den Strom aus einer Oberleitung beziehen (Siemens, 2012). Dieses Forschungsvorhaben wurde in den Folgejahren bis 2015 weitergeführt (Siemens, 2016a) und im Jahr 2016 wurde in Schweden auf einem 2 km langen Autobahnstück ein erster Feldversuch auf öffentlichen Straßen gestartet (Siemens, 2016b). Inzwischen gibt es in Deutschland drei Versuchsstrecken auf öffentlichen Straßen, wo Technik und Praktikabilität getestet werden. Diese, mit zwischen 3,5 und 10 km, nur sehr kurzen Strecken, sollen in zumindest einem Fall um wenige Kilometer verlängert werden und sind mit einer ersten Versuchslaufzeit von maximal 3 Jahren angelegt.

Für alle nachfolgend aufgeführten Teststrecken gilt gleichermaßen:

- Die Elektrotechnik, die Unterwerke, die Oberleitung und die Elektrifizierung der LKW liefert Siemens Mobility, eine Tochter der Siemens AG.
- Die Teststrecken wurden in Zusammenarbeit mit örtlichen oder regionalen Verwaltungen oder Landes- und Bundesregierungen beschlossen, geplant und gebaut.
- Die Teststrecken erhalten staatliche Förderungen.
- Die Teststrecken sind Teil von Forschungsprojekten unterschiedlicher Hochschulen und Forschungsinstitute.
- Die Teststrecken sind mit maximal 10 km je Fahrtrichtung sehr kurz.
- Die Teststrecken laufen auf flachem Gelände ohne Steigungen.
- Die Zahl der eingesetzten HO-LKW ist, mit zwischen eins und fünf, sehr klein.

Die Berichterstattung zu den Teststrecken in Deutschland ist in den öffentlichen Medien sehr geprägt von der jeweiligen Sichtweise und bei genauer Betrachtung oft wenig fundiert bis substanzlos. In Lahl (2020) der ATZ antwortet Professor Dr. Uwe Lahl auf die Frage „Welche Punkte zeichnet das Projekt eWayBW aus?“ sehr vage: „Im Projekt eWayBW wird ein Feldversuch durchgeführt, bei dem elektrische Antriebe für schwere Nutzfahrzeuge auf baden-württembergischen Bundesfernstraßen getestet werden. Dies hebt die Bedeutung der Erforschung aller Möglichkeiten hervor, die helfen, Emissionen einzusparen“. Während von Seiten der zuständigen Politiker die große Bedeutung der Teststrecken für die Gewinnung valider Daten betont wird, berichten beteiligte Forschungsinstitute davon, dass im Falle des eWayBW diese Daten in ausreichendem Maße erhoben werden können, auch nachdem von den ursprünglich vier beteiligten Werken nur noch zwei existieren und die Teststrecke monatelang außer Betrieb war. Gleichzeitig, oder vielleicht deswegen, wird auf weiteren Forschungsbedarf hingewiesen und über eine Verlängerung des Testzeitraums nachgedacht.

2.4.1 Schweden

Im Juni 2016 wurde auf der Autobahn E16, nördlich von Stockholm, weltweit der erste eHighway mit 2 km Länge auf öffentlichen Straßen in Betrieb genommen. Unter der Federführung von Siemens Mobility wurden für einen Zeitraum von zwei Jahren der Einsatz des von Siemens entwickelten Oberleitungssystems für den Güterkraftverkehr getestet. Verwendet wurden zwei Sattelzugmaschinen mit einem Diesel-Hybridantrieb, die von Scania für diesen Einsatz entwickelt worden waren. Laut der Pressemitteilung Siemens (2016b) wollen die schwedische Verkehrsbehörde Trafikverket und die Verwaltung des Bezirks Gävleborg mit diesem Projekt erkunden, ob das System eHighway geeignet ist, einen wesentlichen Beitrag zum CO₂-freien Straßengüterverkehr zu leisten, den Schweden bis 2030 erreichen will. Laut Siemens soll dabei der Energieverbrauch auf die Hälfte zurückgehen.

2.4.2 USA

Mit einer Pressemeldung vom 08.11.2017 informiert Siemens über den zweiten eHighway auf öffentlichen Straßen. Dieser, mit einer Länge von 1 Meile, liegt auf der Verbindungsstrecke der beiden großen Häfen Long Beach und Los Angeles mit den benachbarten Güterverteilzentren (GVZ). Eingesetzt werden Sattelzugmaschinen mit unterschiedlichen hybriden Energieträgern: Die LKW mit Traktionsbatterie und Gas wurden von TransPower hergestellt, die LKW mit hybridem Dieselantrieb wurden von der Firma Mack gebaut, einer Tochterfirma von Volvo trucks.

Merkmale: Extrem kurze Strecke von 1 Meile in beiden Richtungen.

2.4.3 ELISA in Hessen

Unter dem Projektnamen *Elektrifizierter, Innovativer Schwerverkehr auf Autobahnen* (ELISA) wurde Ende 2018 der erste eHighway in Deutschland fertiggestellt

und im Mai 2019 in Betrieb genommen. Auf der Bundesautobahn (BAB) A5, zwischen den Anschlussstellen Langen/Mörfelden und Weiterstadt, wurde auf beiden Richtungsfahrbahnen ein jeweils 10 km langes Teilstück mit einer Oberleitung ausgerüstet. Über einen Zeitraum von vier Jahren sollen bis Ende 2022 mit fünf Lastzügen Fahrzeug- und Streckentechnik erprobt werden. Geplant war eine einseitige Verlängerung der Strecke in Richtung Süden um fünf Kilometer. Die Kosten beliefen sich für den ersten Bauabschnitt auf bisher 14,6 Mio. € und werden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) zur Verfügung gestellt.

Inzwischen ist die Strecke in Richtung Süden auf 17 km Länge ausgebaut worden und wird nach Angaben von *Mobiles Hessen* von 10 HO-LKW befahren. Einer zeitweise diskutierten, weit größeren Verlängerung bis zur Schweizer Grenze wurde eine Absage erteilt.

Merkmale: Stark befahrene Autobahn. Nähe zum Cargoterminal Rhein/Main



Abbildung 2.8: HO-LKW auf eHighway ELISA in Hessen.

(Quelle: <https://www.autobahn.de/planen-bauen/projekt/e-highway>)

2.4.4 FESH in Schleswig-Holstein

Ende 2019 wurde, auf der BAB A1 wurde zwischen Reinfeld und Lübeck, ein Teilstück von 5 km Länge in beiden Fahrtrichtungen elektrifiziert. Unter dem Projektnamen *Feldversuch eHighway Schleswig-Holstein* (FESH) sollen bis Ende 2022 umfangreiche Erkenntnisse gewonnen werden. Der Projektbeschreibung ist folgendes Zitat zu entnehmen: „Ziel des Feldversuches ist, dieses System technisch, ökologisch, ökonomisch und unter Verkehrsgesichtspunkten zu bewerten, um der Politik Entscheidungsgrundlagen für einen möglichen Ausbau zu liefern“. Merkmale: Anbindung des Hafen Lübeck



Abbildung 2.9: HO-LKW auf eHighway FESH in Schleswig-Holstein
(Quelle: <https://ehighway-sh.de/forschung/>)

2.4.5 eWayBW in Baden-Württemberg

Der erste eWay auf einer Bundesstraße wurde am 28.06.2021 auf zwei Teilstücken der B462 eröffnet. Dort sollen rund um die Uhr fünf Shuttlefahrzeuge Karton und Kartonanagen von vier Fabriken aus dem Murgtal zu den Lagerhäusern in der Nähe der Autobahn A5 transportieren.

Merkmale: Erstmals ein eWay auf einer Bundesstraße. Die Strecke von knapp 3,5 km ist, wie in Abb. 2.10 aus Hagen et al. (2022) gezeigt, in zwei Teilstücke unterteilt.



Abbildung 2.10: eWayBW auf Bundesstraße B462

Da die Strecke erst mit monatelanger Verzögerung in Betrieb genommen werden konnte und während der planmäßigen Testphase von drei Jahren durch diverse Unterbrechungen nicht für Testfahrten genutzt werden konnte, wird der Testbetrieb um sechs Monate bis zum Jahresende 2024 verlängert. Damit soll gewährleistet werden, dass der ab Mai 2024 eingesetzte Sattelzug eActros 600 mit reinem Batterieantrieb während verschiedener jahreszeitlicher Wetterbedingungen getestet werden kann.

2.4.6 Teststrecken in Planung

In Wietschel, Burghard et al. (2020) wird im Abschnitt 3.2 zu europäischen Überlegungen berichtet. Die verwendeten Formulierungen sind sehr vage und deuten allenfalls auf Absichtserklärungen hin. In Italien sei auf der A35 tatsächlich ein Feldversuch in Planung, allerdings lassen sich aktuell hierzu keine weiteren

Informationen finden. Anlässlich einer Veranstaltung am 16.05.2024 berichten Andersson und Plötz (2024) zu den bereits bekannten Projekten in Schweden, Deutschland und Italien, aber auch zu neuen Projekten in mehreren weiteren europäischen Ländern. Vor allem die Planungen in den Niederlanden mit Verbindungen nach Belgien und nach Deutschland (Abb. 2.11 aus dieser Tagung) sind bereits sehr konkret. Mit dem Ausbau internationaler Strecken befasst sich Hacker et al. (2023). Das dort auf Seite 20 dargestellte Netz soll in drei Etappen von Schweden im Norden südwärts bis Nordspanien und Mittelitalien ausgebaut werden und eine West-Ost-Verbindung soll ab Irland über Mittelengland bis Polen führen.

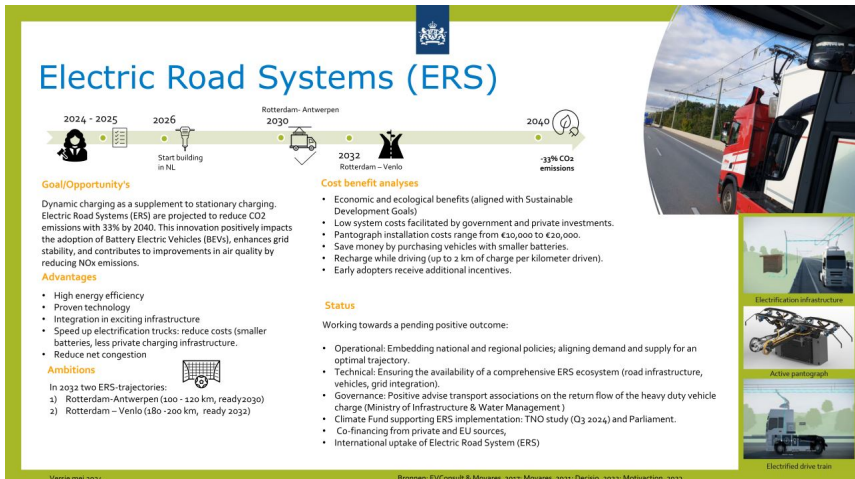


Abbildung 2.11: Geplante Electric Road Systems (ERS) in den Niederlanden

2.5 Oberleitungsnetze

Soll das System eHighway einen nennenswerten Anteil zur CO₂-Reduktion im Straßenverkehr bringen, dann müssen eWays gebaut werden. Dazu gibt es in

den Forschungsberichten der eingangs erwähnten drei Institute umfangreiche Untersuchungen, wo diese Strecken mit welcher Länge und in welcher zeitlichen Abfolge errichtet werden sollen. Grundlage bildet dabei die durchschnittliche LKW-Frequenz auf diesen Autobahnstrecken. Eine immer größere Ausdehnung des eWay-Netzes wird zwar immer höhere Anteile von elektrischem Fahren bewirken können, aber zunehmend relativ teurer werden, da am Ende die weniger stark befahrenen Straßen ausgerüstet werden. Es werden deshalb unterschiedliche Ausbaustufen möglicher eWay-Netze in Deutschland beschrieben und untersucht, welche sich für unterschiedliche Betriebsmodelle in besonderem Maße eignen. Dabei werden ermittelt:

- Gesamtstrecke
- Elektrostrecke
- Prozentualer Anteil Elektrostrecke an Gesamtstrecke
- Anteile unterschiedlicher Elektrostrecken
- Distanz von Abgangsort zu erstmaligem Nutzen einer Elektrostrecke
- In welchem Grad Elektrostrecken in beiden Fahrtrichtungen genutzt werden.

Auf den Karten der Telematiksoftware *Satlog* konnten die diversen Ausbaustufen 1 bis 4 nachgebildet werden und die Abbildungen 2.12 und 2.13 zeigen das beispielhaft. Zusätzlich zu diesen Strecken untersucht diese Arbeit in den Abschnitten 3.4.1.2 und 5.5 ein mögliches Hub-Netz um Bad Hersfeld, das schrittweise Bestandteil des größer werdenden Oberleitungsnetzes wird. Die beiden Ausbaustufen dieses Hub-Netzes sind auf Karten von Google Maps dargestellt.

2.5.1 Ausbaustufe 1

Wietschel, Gnann et al. (2017) wählen mit Bezug auf die hohe Frequenz von täglich 3.200 SZM als 1. Ausbaustufe die zwei in Abb. 2.12 links gezeigten Autobahnstrecken:

- Karlsruhe – Hamburg mit ca. 600 km
- Autobahnkreuz Kamen – Hamburg mit ca. 290 km

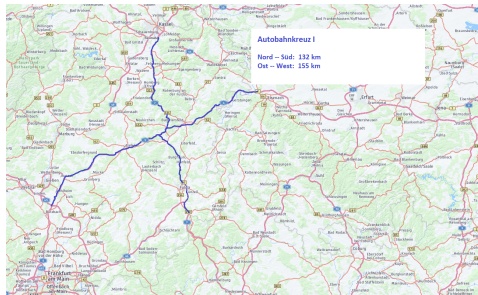


Abbildung 2.12: eWay Ausbaustufe 1 und kleines Hub-Netz. (Quelle: Satlog, eigene Darstellung)

Bereits in der Ausbaustufe 1 ist die Strecke von Karlsruhe nach Hamburg im Abschnitt Autobahnkreuz Gambach bis Lohfelden (kurz vor Kassel) deckungsgleich mit einem in Abb. 2.12 rechts dargestellten Teilstück des kleinen Hub-Netzes.

2.5.2 Ausbaustufe 2

Die Ausbaustufe 2 umfasst weitere rund 1.000 km mit einer nun reduzierten Belastung von jeweils 2.300 SZM pro Tag:

- die Verlängerung der BAB1 Hamburg–Kamen über das Kreuz Leverkusen bis nach Wiesbaden,

- die Teilstrecke auf der BAB44 ab Kreuz Unna bis Kassel,
- die Teilstrecken auf der BAB7 und BAB3 vom Kirchheimer Dreieck bis Nürnberg,
- die Teilstrecke auf der BAB2 zwischen Hannover und Magdeburg,
- die Teilstrecke auf der BAB9 von Leipzig bis Nürnberg
- und das kleine Teilstück auf der BAB8 zwischen Karlsruhe und Stuttgart.

Das Teilstück Kirchheimer Dreieck bis Bad Brückenau ist ebenfalls ein Teil des Hub-Netzes. Damit sind 3 der 4 Äste des Hub-Netzes Bestandteil der Ausbaustufen 1 bis 2.

2.5.3 Ausbaustufe 4

Mit den weiteren Ausbausritten der Stufen 3 und 4 summieren sich die elektrifizierten Trassen auf ungefähr 4.000 km Autobahnstrecken, die jeweils beidseitig als eWay ausgerüstet sind. Sie sind im Wesentlichen als Abb. 2.13 dargestellt und bilden die Grundlage der nachfolgenden Auswertungen. Laut Wietschel, Gnann et al. (2017) sollen diese Strecken 60% des LKW-Verkehrs aufnehmen.

Ein Blick auf Abb. 2.13 zeigt, dass in der untersuchten Ausbaustufe 4 westlich der Strecke von Hamburg über Unna, Leverkusen, Wiesbaden nach Karlsruhe und südlich der Strecke von Karlsruhe nach München sowie östlich der Strecke von München nach Nürnberg große Gebiete noch immer nicht an das eWay-Netz angeschlossen sind. Die dadurch bedingten erheblichen Entfernungen zwischen Abgangs- oder Empfangsstationen bis Erreichen eines eWay spielen eine Rolle bei der Eignung bestimmter Betriebsmodelle, im Abschnitt Traktionsmodell wird hierauf Bezug genommen.



Abbildung 2.13: eWays der Ausbaustufe 3 und 4. (Quelle: Satlog)

2.5.4 Längenbestimmung

In dieser Arbeit wurden die Längen von Elektrostrecken aus der Strecke zwischen den für dieses Autobahnabschnitt gesetzten Markern ermittelt. Die so ermittelten Längen decken sich in etwa mit den Angaben, die in Wietschel, Gnann et al. (2017) gemacht worden sind, wie die folgenden zwei Beispiele zeigen:

- Karlsruhe–Hamburg 615 km zu 597 km eigen ermittelter Strecke
- Hamburg–Kamen 290 km zu 287 km eigen ermittelter Strecke

Die Differenzen kommen aus den unterschiedlichen Anfangs- und Endpunkten der Strecken und machen in den angeführten Beispielen einen Unterschied von 3% und 1% aus.

Tatsächlich werden die Längen solcher Elektrostrecken aber nicht durchgängig aus der Streckenlänge zwischen Start- und Endpunkt zu bestimmen sein. Es ist

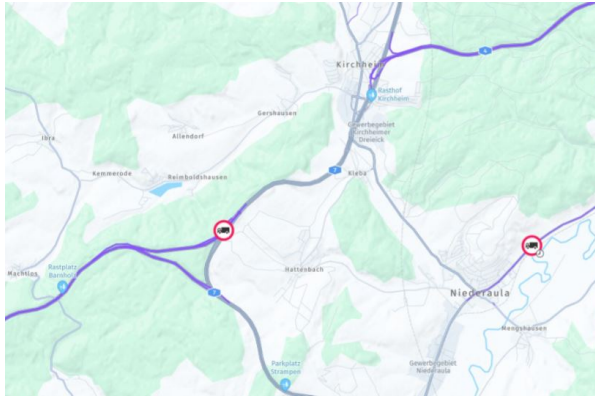


Abbildung 2.14: Unterbrechung des eWay durch Autobahnanschlüsse
(Quelle: Satlog GmbH, Weinheim)

davon auszugehen, dass insbesondere bei Autobahnkreuzungen die Oberleitungen nicht komplett durchgeführt werden. In dieser Arbeit wurden daher für jedes Autobahndreieck oder Autobahnkreuz ein Abzug von zwei Kilometern angesetzt. Ein Beispiel zeigt Abb. 2.14 mit den Autobahndreiecken Hattenbach und Kirchheim, wo auf der BAB 5 und der BAB 7 auf einer Strecke von ca. 13 Kilometern mehrmals Fahrspuren einmünden oder abgehen und zusätzlich eine Anschlussstelle passiert wird.

Unterbrechungen könnten auch bei Brückenbauwerken, Unterführungen oder engen Kurvenradien auftreten. Dieses setzt voraus, dass die HO-Fahrzeuge, soweit sie nicht über hybriden Zusatzantrieb verfügen, ausreichend große Speicherbatterien haben. Nimmt man an, dass auf der ungefähr 600 km langen HO-Strecke zwischen Karlsruhe und Hamburg 50 solcher Unterbrechungen von 2 km Länge passiert werden und unter der Oberleitung keine Aufladung der Batterie stattfindet, dann müsste diese, beim in dieser Arbeit angenommenen Stromverbrauch von 1,25 kWh/km, zumindest eine Kapazität von 125 kWh haben. Mit stärkeren Batterien können die Oberleitungsstrecken, zusätzlich zu den bautechnisch bedingten, gezielt mit weiteren Lücken ausgestattet werden die jeweils mit Strom aus der Speicherbatterie überbrückt werden.

Die Länge der Elektrostrecke hat direkten Einfluss auf die Baukosten, die in den verwendeten Formeln als Produkt aus Streckenlänge S_{tras} mal Trassengrundpreis CB_{tras} ermittelt werden. Kürzere Strecken bedeuten demnach zunächst niedrigere Baukosten. Unterbrechungen der Strecke mit neuen Zu- und Abgängen zur Mittelspannung bedeuten aber höhere Baukosten. Diese Einflüsse bleiben hier unberücksichtigt.

In Kühnel et al. (2018, S 5) finden sich bezüglich der Kosten einer Oberleitungsinfrastruktur zwei zumindest teilweise widersprüchliche Aussagen:

- „Der Aufbau der Oberleitungsinfrastruktur ist mit verhältnismäßig geringen Investitionen verbunden“.
- „Der Aufbau einer Oberleitungsinfrastruktur ist im Vergleich zu den anderen betrachteten Energieversorgungssystemen (LNG, Wasserstoff, stationsbasierte Stromversorgung) mit den höchsten Investitionskosten pro Fahrzeug verbunden“.

2.5.5 Parallele Strecken und Routenplanung

LKW-Fahrer nutzen heute aktiv Routenplaner, indem sie anstehende Fahrtstrecken dort eingeben und dann den Vorschlägen folgen, oder sie bekommen diese Routen über ihre Bordcomputer aus den Softwaresystemen ihrer Speditionen schon direkt vorgegeben. In den gängigen Routenplanern kann man Voreinstellungen wählen, wie *Autobahn meiden* oder *Mautstrecke meiden* und ähnliche. Im Falle des eWay müssten solche Planungssysteme eWays erkennen und diese im Falle annähernd paralleler Strecken auch vorschlagen. Kleinere Umwege könnten zumindest unter Kostenaspekten durch geringere Treibstoffkosten und, je nach Mautgestaltung, auch geringere Mautkosten kompensiert werden. Als Beispiel solcher Fälle taugt die in Abb. 2.15 dargestellte Fahrtstrecke von Karlsruhe nach Hagen/Westfalen. Dort kommen zumindest zwei Routen in Frage:

- Route 1 ab Karlsruhe über die BAB5 bis Autobahnkreuz Gambach und dort auf die BAB45 bis Hagen

- Route 2 ab Karlsruhe über die BAB5 bis Autobahnkreuz Darmstadt und dann über die BAB3 bis Leverkusen und die BAB1 bis Hagen

Google Maps gibt für Route 1 eine Entfernung von 335 km aus und für Route 2 eine Entfernung von 359 km. Die Fahrtstrecke für PKW ist dabei auf Route 1 um 11 Minuten kürzer.

Route 1 wäre zwischen Karlsruhe und Gambacher Kreuz bereits in der ersten Ausbaustufe als eWay ausgeführt. Für Route 2 trifft das nur zwischen Karlsruhe und Darmstadt zu. In diesem Fall spräche also alles für Route 1, wenn man die aktuelle Verkehrssituation unberücksichtigt lässt. Abb. 2.15 links zeigt auf dieser Route allerdings eine Häufung von Baustellen, die aufgrund unvorhersehbarer Staus den Zeitvorteil abschmelzen würden. Zusätzlich laufen zwischen den Autobahnkreuzen Walldorf und Darmstadt die Autobahnen BAB5 und BAB6/BAB67 annähernd parallel. Die Routenplaner schlagen je nach Verkehr beide Strecken vor, oft auf Hin- und Rückfahrt jeweils unterschiedlich. In allen Ausbaustufen wäre allerdings nur die BAB5 ein eWay und dieser müsste für die HO-SZM vorgeschlagen werden.

Im aktuellen Beispiel könnte man, wie in Abb. 2.15 rechts dargestellt, sogar eine dritte Route wählen, die ab Autobahnkreuz Walldorf der BAB 61 über Koblenz bis Köln folgt und ab dort die BAB1 bis Hagen nimmt. Mit 386 km ist diese nun deutlich länger und bis in Ausbaustufe 4 auch nicht als eWay vorgesehen. Das deckt sich mit den eigenen Auswertungen, in denen die Strecke versuchsweise bis Mönchengladbach als eWay hinterlegt wurde, aber von den knapp 1.000 Touren nur einige wenige Male befahren worden ist.

2.5.6 Auswertungen

Die in den Forschungsberichten ermittelte Reihenfolge der zuvor dargestellten Ausbaustufen leitet sich aus der LKW-Frequenz auf diesen Strecken ab. Diese beinhaltet auch den Transitverkehr durch Deutschland. Die Werte in der Tabelle 2.1 stammen aus Prokop und Stoller (2012) und zeigen ab 2030 nur eine geringe

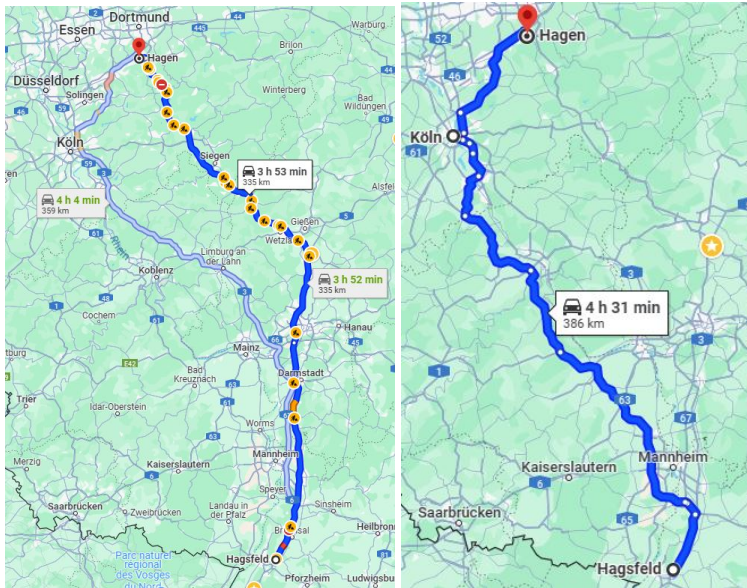


Abbildung 2.15: Alternative Routen (Quelle: Google Maps)

Zunahme des Durchgangsverkehrs. Adolf und Balthasar (2010) erwarten bis 2050 eine Verdreifachung des Transitverkehrs, der dann, ähnlich dem Wert aus der zuvor zitierten Quelle, mehr als ein Fünftel der Verkehrsleistung auf deutschen Straßen ausmachen wird. Da diese Arbeit den deutschen Güterkraftverkehr im Blick hat, wird eine andere **Methodik** verfolgt:

Es sollen rund 1.000 innerdeutsche Touren untersucht werden, deren Abgangsorte möglichst gleichmäßig über Deutschland verteilt sind. Unter der Annahme, dass bei Transportentfernungen von unter 50 km die LKW entweder keine HO-SZM sind oder keinen eWay erreichen, sollen in jedem der zweistelligen PLZ-Gebiete drei Versandorte gewählt werden, von denen jeweils drei Touren in unterschiedlichen Entfernungsstufen starten.

51 bis 200 km

201 bis 500 km

> 500 km

Tabelle 2.1: Anteil des Transitverkehrs an der Gesamtleistung

Güterverkehrsleistung in Milliarden tkm	2005	2030	2050
Gesamtleistung	581	982	1.218
Durchgangsverkehr	83	196	260
Anteil	14,3%	20,0%	21,3%

Quelle: BMVBS, Protrans 2007; eigene Darstellung

Bei einer maximalen Ausdehnung von rund 150 km, sowohl von Nord nach Süd als auch von Ost nach West, im Schnitt unter 100 km, können drei Abgangsorte die Gebiete gleichmäßig abdecken.

Theoretisch sollte das 900 Touren ergeben, die aus allen Gebieten quer über Deutschland laufen. Da allein für Berlin die Gebiete 10 bis 13 reserviert sind und in anderen Gebieten nicht immer 10 zweistellige Bezirke angelegt worden sind, konnten gemäß dieser Systematik tatsächlich nur 831 Touren bestimmt werden. Zusätzlich wurden aus dem Kreis befreundeter Spediteure weitere 135 Touren erfasst, sodass schließlich 966 Transporte ausgewertet werden konnten.

Auf einer Planungssoftware der Firma *Satlog GmbH* in Weinheim wurden verschiedene Teilstrecken des deutschen Autobahnnetzes als Elektrostrecken gekennzeichnet. Dazu wurden in beiden Fahrtrichtungen jeweils am Anfangs- und Endpunkt der Teilstrecke ein Marker gesetzt. Die Entfernungsermittlung lief in *Satlog* über Karten von *Here Technologies* mit der Einstellung *LKW 40-Tonnen* und *schnellste Strecke*. Dabei wurden Elektrostrecken nicht gezielt in die Strecke eingebunden, sondern lediglich als solche erkannt, wenn die gesetzten Marker passiert wurden.

Die ermittelten Teil- und Gesamtstrecken konnten aus *Satlog* als Excel-Dateien exportiert und dann ausgewertet werden. Die Ausgangsdateien und diverse Tabellen mit Auswertungen befinden sich im Anhang unter der Überschrift *Transportlisten*. Einen Auszug aus einer solchen Liste zeigt die Tabelle 2.2.

Tabelle 2.2: Auszug aus Transportliste für PLZ-Gebiet 1

Transportliste (Auszug)							
Position	Entfernungszone	PLZ-Gebiet	PLZ	Abgangsort	PLZ	Empfangsort	km
1	50 - 200 km	10	10115	Berlin	17033	Neubrandenburg	183
2	201 - 500 km	12	12203	Berlin	30159	Hannover	290
3	>500 km	13	13347	Berlin	79098	Freiburg	810
4	50 - 200 km	14	14467	Potsdam	03491	Wittenberg	80
5	201 - 500 km	14	14467	Potsdam	28199	Bremen	364
6	>500 km	14	14467	Potsdam	66111	Saarbrücken	706
7	50 - 200 km	14	14641	Nauen	16831	Rheinsberg	77
8	201 - 500 km	14	14641	Nauen	26721	Emden	497
9	>500 km	14	14641	Nauen	87435	Kempten	692
10	50 - 200 km	14	14913	Jüterbog	39340	Haldensleben	176
11	201 - 500 km	14	14913	Jüterbog	31785	Hameln	246
12	>500 km	14	14913	Jüterbog	76131	Karlsruhe	627
13	50 - 200 km	15	15230	Frankfurt / Oder	02826	Görlitz	178
14	201 - 500 km	15	15230	Frankfurt / Oder	99867	Gotha	385
15	>500 km	15	15230	Frankfurt / Oder	49716	Meppen	597
16	50 - 200 km	15	15517	Fürstenwalde	39291	Genthin	167
17	201 - 500 km	15	15517	Fürstenwalde	29664	Walsrode	430
18	>500 km	15	15517	Fürstenwalde	54290	Trier	764
19	50 - 200 km	15	15711	Königs Wusterhausen	14547	Beelitz	55
20	201 - 500 km	15	15711	Königs Wusterhausen	98527	Suhl	363
21	>500 km	15	15711	Königs Wusterhausen	72760	Reutlingen	684
22	50 - 200 km	16	16225	Eberswalde	17389	Anklam	142
23	201 - 500 km	16	16225	Eberswalde	95632	Wunsiedel	463
24	>500 km	16	16225	Eberswalde	76593	Gernsbach	796
25	50 - 200 km	16	16303	Schwedt	10115	Berlin	106
26	201 - 500 km	16	16303	Schwedt	07743	Jena	388
27	>500 km	16	16303	Schwedt	56168	Koblenz	778

Die Auswertung der Transportdaten erfolgt getrennt nach den 831 stochastisch über Deutschland verteilten Touren einerseits (Teil 1) und den 135 Touren der Spediteure andererseits (Teil 2). Für beide Teile erfolgt eine Gesamtbetrachtung und

eine Einzelbetrachtung. In der Gesamtbetrachtung soll der Effekt der Elektrifizierung gemäß Ausbaustufe 4 insgesamt ermittelt werden, in der Einzelbetrachtung die Wirkung einzelner Streckenabschnitte.

Die Trennung der insgesamt 966 Touren nach dem oben beschriebenen Schema erfolgt aus zwei Gründen:

Teil 1 sollte Werte ergeben, die mit denen der diversen Forschungsberichte verglichen werden können und diese bestenfalls bestätigen.

Teil 2 fußt auf den Angaben von Spediteuren, die mehrheitlich in Baden-Württemberg ansässig sind. Es soll festgestellt werden, ob sich dadurch in der Gesamtbetrachtung dennoch ähnliche Werte zeigen, wobei in der Einzelbetrachtung Abweichungen durchaus zu erwarten sind.

Für beide Teile gelten die Feststellungen aus dem Abschnitt 2.5.4, wo es um die Lücken innerhalb der Elektrostrecken geht, gleichermaßen: Eine erste Einschätzung dieser Effekte zeigt die Tabelle 2.3, wo entlang der Elektrostrecken die Anzahl der zu passierenden Autobahnkreuze oder großen Anschlussstellen erfasst und mit einem Wert für die Länge der Unterbrechung bewertet werden kann. Dies führt zu zwei Konsequenzen:

Die Länge der tatsächlich zur Verfügung stehenden Elektrostrecken wird kleiner, der prozentuale Elektroanteil sinkt.

In die Berechnung der Systemkosten fließen die Baukosten der Elektrotrasse proportional zu deren Länge ein. Die kürzere Strecke ergibt demnach geringere Baukosten. Da sich die kürzere Strecke aber durch Unterbrechungen ergibt und die Oberleitung jeweils beendet und wieder neu aufgenommen werden muss, werden in den Berechnungen verminderte Baukosten nicht berücksichtigt.

Tabelle 2.3: Abzug von Elektrokilometern an Autobahnkreuzen oder Anschlussstellen

Abzug für Autobahnkreuzen oder Anschlussstellen							
Name E-Netz	Name Autobahn	Von	Bis	Entfernung [km]	Anzahl Kreuze	Abzug für Kreuz [km]	E-Strecke netto [km]
							Abzug [%]
R-S 1	A5	HH-Seevetal	Karlsruhe (Durlach)	597	12	24	573
S-A 1	A5	Karlsruhe (Durlach)	HH-Seevetal	597	12	24	573
N-W 1	A1	Hamburg (Buxtehude)	Kamen	285	4	8	277
W-N 1	A1	Kamen	Hamburg (Buxtehude)	285	4	8	277
UN-W1	A1 / A3	Kreuz Unna	Kreuz Wiesbaden	246	6	12	234
WI-UN	A1 / A3	Kreuz Wiesbaden	Kreuz Unna	246	6	12	234
UN-KAS	A44	Kreuz Unna	Kassel	141	3	6	135
KAS-UN	A44	Kassel	Kreuz Unna	141	3	6	135
FR-BI	A3	Kreuz Frankfurt	Biebelried	124	3	6	118
BI-FR	A3	Biebelried	Kreuz Frankfurt	124	3	6	118
K-NÜ	A3 / A7	Dreieck Hattenbach	Nürnberg	238	6	12	226
NÜ-KI	A3 / A7	Nürnberg	Dreieck Hattenbach	238	6	12	226
N-S 2	A9, A6	Kloster Lehnin	Walldorf	583	8	16	567
S-N 2	A6, A9	Walldorf	Kloster Lehnin	583	8	16	567
N-O 1	A9	Nürnberg	Garching	141	6	12	129
O-N 1	A9	Garching	Nürnberg	141	6	12	129
HA-BE	A24	Hamburg	Berlin Oranienburg	240	2	4	236
BE-HA	A24	Berlin Oranienburg	Hamburg	240	2	4	236
O-W 1	A2	Frankfurt/Oder	Kamen	534	8	16	518
W-O 1	A2	Kamen	Frankfurt/Oder	534	8	16	518
M-W 1	A45	Pohlheim	Schwerte	166	4	8	158
W-M 1	A45	Schwerte	Pohlheim	166	4	8	158
O-W 2	A8	München	Karlsruhe	257	3	6	251
W-O 2	A8	Karlsruhe	München	257	3	6	251
O-W 3	A4	Görlitz	Kirchheim	423	3	6	417
W-O 3	A4	Kirchheim	Görlitz	423	3	6	417
				3.975		272	6,8%

2.5.6.1 Gesamtbetrachtung

Zunächst werden für die Gesamtheit aller Transporte jeweils die Summe der Transportentfernungen S_{gesamt} und die Summe der dabei auf Elektrostrecken zurückgelegten Distanzen $S_{\text{elektrisch}}$ ermittelt. Die Tabellen 2.4 und 2.5 zeigen diese Werte für die Touren aus Teil 1 (stochastische Verteilung). Bei insgesamt mehr als 307 Tsd. gefahrenen Kilometern entfallen mehr als 171 Tsd. Kilometer auf die in Abbildung 2.13 als Ausbaustufe 4 dargestellten Elektrostrecken. Der Elektroanteil beträgt demnach 55,8% und steht im Vergleich zu Wietschel, Gnnann et al. (2017) wo er im eingeschwungenen Zustand mit 60% angegeben wird.

Die Tabellen 2.6 und 2.7 stellen den Verlauf der untersuchten 831 Touren über Deutschland dar. Man sieht in den Summenzeilen die gleichmäßige Verteilung mit den oben beschriebenen Ausnahmen im PLZ-Gebiet 0 und PLZ-Gebiet 1. Innerhalb der Tabellen zeigen sich aber erhebliche Unterschiede, mit 1% als

Tabelle 2.4: Gefahrene Kilometer von PLZ nach PLZ-Gebiet

Nach PLZ-Gebiet	Von PLZ-Gebiet										Summe km Eingang
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
0	1.731	1.939	2.378	2.354	2.747	2.470	2.077	3.047	2.378	1.939	23.060
1	1.939	2.172	2.663	2.637	3.076	2.766	2.327	3.413	2.663	2.172	25.827
2	2.378	2.663	3.265	3.233	3.772	3.392	2.853	4.184	3.265	2.663	31.669
3	2.354	2.637	3.233	3.202	3.736	3.359	2.825	4.144	3.233	2.637	31.361
4	2.747	3.076	3.772	3.736	4.358	3.919	3.296	4.834	3.772	3.076	36.588
5	2.470	2.766	3.392	3.359	3.919	3.524	2.964	4.347	3.392	2.766	32.898
6	2.077	2.327	2.853	2.825	3.296	2.964	2.493	3.656	2.853	2.327	27.672
7	3.047	3.413	4.184	4.144	4.834	4.347	3.656	5.363	4.184	3.413	40.585
8	2.378	2.663	3.265	3.233	3.772	3.392	2.853	4.184	3.265	2.663	31.669
9	1.939	2.172	2.663	2.637	3.076	2.766	2.327	3.413	2.663	2.172	25.827
Summe km Versand	23.060	25.827	31.669	31.361	36.588	32.898	27.672	40.585	31.669	25.827	307.154

Tabelle 2.5: Anzahl Elektrokilometer von PLZ- nach PLZ-Gebieten

Nach PLZ-Gebiet	Von PLZ-Gebiet										Summe km Eingang
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
0	527	476	1.738	1.673	2.598	1.628	1.899	1.908	1.798	1.117	15.361
1	1.156	277	1.831	3.581	3.618	6.685	4.921	3.282	3.286	4.058	32.695
2	2.242	1.552	412	1.109	1.316	1.852	3.967	9.094	7.197	5.515	34.254
3	625	2.088	50	1.258	1.282	1.710	2.302	2.023	4.365	1.397	17.100
4	859	833	868	236	17	-	989	141	1.515	2.130	7.586
5	1.639	1.016	1.281	443	393	170	175	702	1.064	837	7.721
6	856	1.430	840	645	167	44	101	77	1.433	503	6.097
7	1.250	4.314	2.043	1.798	1.048	727	587	158	373	763	13.060
8	2.382	2.126	2.407	3.502	3.525	2.371	1.570	851	298	347	19.380
9	500	1.761	5.585	1.618	2.383	2.870	1.086	2.525	211	75	18.615
Summe Elektro-km Ausgang	12.036	15.874	17.054	15.861	16.347	18.058	17.597	20.761	21.539	16.741	171.869
Anteil Elektro-km	52%	61%	54%	51%	45%	55%	64%	51%	68%	65%	56%

niedrigstem und 28% als höchstem Wert für die Relationsverteilung. Das kann Auswirkungen auf die Ergebnisse im Abschnitt Einzelbetrachtungen haben.

Die Touren der Spediteure (Teil 2) haben eine Gesamtlänge von fast 43 Tsd. Kilometern und laufen dabei zu 54,5% über Elektrostrecken. Dieser Wert weicht um nur 2% vom Wert der stochastisch verteilten Touren ab, obwohl die Touren der Spediteure eine Häufung im Süden Deutschlands aufweisen. Dieses lässt den Schluss zu, dass die Ausbaustufe 4, mit fast 4.000 km Elektrostrecke, zu einer deutschlandweit gleichmäßigen Abdeckung führt, was im nächsten Abschnitt noch genauer überprüft wird.

2.5.6.2 Einzelbetrachtung

Es sollen folgende Fragen untersucht werden:

1. Mit welchem Anteil an der Transportstrecke werden die unterschiedlichen eWays befahren?
2. Wird die Reihenfolge der Ausbaustufen bestätigt?
3. Werden die Strecken in beiden Fahrtrichtungen gleich stark befahren?
4. Gibt es eine Strecke, die für ein bestimmtes Betriebsmodell besonders geeignet ist?
5. Gibt es, bezogen auf die 2-stelligen PLZ-Gebiete, wesentliche Unterschiede bei der Entfernung zum nächsten eWay?
6. Wie groß sind durchschnittlich die Zu- und Abläufe, die bei den Berechnungen zum Traktionsverkehr von Bedeutung sind? Gibt es dabei deutliche Unterschiede? Welchen Einfluss hat das auf den Traktionsverkehr?

Zur Verdeutlichung der Werte in Tabelle 2.8 erfolgt in Abb. 2.16 nochmals die Darstellung der eWays mit Benennung der Anfangs- und Endpunkte. Die ausgewiesenen Elektrokilometer werden als Summe der beiden Fahrtrichtungen dargestellt.

Tabelle 2.6: Anzahl Touren von PLZ- nach PLZ-Gebieten

Nach PLZ-Gebiet	Von PLZ-Gebiet										Summe empfangener Touren
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
0	15	4	9	11	9	5	6	7	7	8	81
1	11	12	15	16	9	15	11	7	7	14	117
2	8	8	25	8	8	7	10	19	15	16	124
3	5	9	2	16	7	16	12	8	13	8	96
4	3	3	8	4	11	2	5	1	3	7	47
5	4	2	5	5	13	16	5	2	4	3	59
6	2	3	2	4	2	3	7	2	6	4	35
7	4	7	4	5	4	7	9	17	5	5	67
8	10	4	5	9	9	7	6	12	22	6	90
9	10	5	15	12	9	12	10	15	8	19	115
Summe versendeter Touren	72	57	90	90	81	90	81	90	90	90	831

Tabelle 2.7: Prozentsatz Anzahl Touren von PLZ- nach PLZ-Gebieten

Nach PLZ-Gebiet	Von PLZ-Gebiet										Summe empfangener Touren
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
0	21%	7%	10%	12%	11%	6%	7%	8%	8%	9%	10%
1	15%	21%	17%	18%	11%	17%	14%	8%	8%	16%	14%
2	11%	14%	28%	9%	10%	8%	12%	21%	17%	18%	15%
3	7%	16%	2%	18%	9%	18%	15%	9%	14%	9%	12%
4	4%	5%	9%	4%	14%	2%	6%	1%	3%	8%	6%
5	6%	4%	6%	6%	16%	18%	6%	2%	4%	3%	7%
6	3%	5%	2%	4%	2%	3%	9%	2%	7%	4%	4%
7	6%	12%	4%	6%	5%	8%	11%	19%	6%	6%	8%
8	14%	7%	6%	10%	11%	8%	7%	13%	24%	7%	11%
9	14%	9%	17%	13%	11%	13%	12%	17%	9%	21%	14%
Summe versendeter Touren	9%	7%	11%	11%	10%	11%	10%	11%	11%	11%	100%

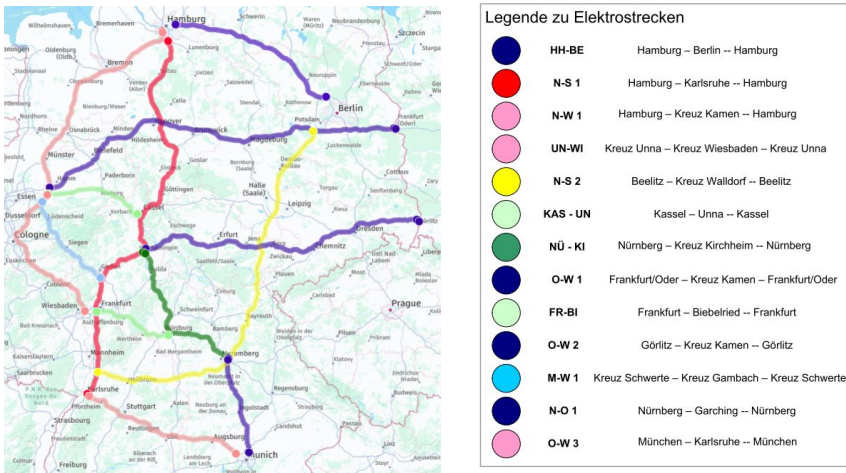


Abbildung 2.16: eWay-Strecken in Ausbaustufe 4

2.5.6.3 Rangfolge nach Elektro-Kilometern

Mit einem Anteil von 27% an den gefahrenen Elektrokilometern liegt der eWay *N-S 1* zwischen Hamburg und Karlsruhe mit weitem Abstand an erster Stelle. Danach folgt mit 19.1% der eWay *N-S 2* zwischen Beelitz (Nähe Schwielowsee) im Norden und Autobahnkreuz Walldorf im Süden. Danach kommt mit dem eWay *O-W 1* die erste der Ost-West-Verbindungen ab Frankfurt/Oder bis an das Autobahnkreuz Kamen. Die prozentualen Werte in Tabelle 2.8 berücksichtigen nicht die Länge der eWay-Trassen. Setzt man die Werte aus der Spalte Elektrokilometer ins Verhältnis zur Länge der jeweiligen eWay, dann bleibt die Reihenfolge innerhalb der ersten vier Werte nahezu unverändert, lediglich KI-NÜ rückt von Platz vier auf Platz zwei. Die wichtigsten Routen auf der Nord/Süd- und der Ost/West-Richtung sind auch nach dieser Sortierung im Vordergrund.

Tabelle 2.8: eWay-Strecken in Einzelbetrachtung

Name der E-Strecken	Summe Elektro Kilometer	Anteil an Gesamtstrecke	Anteil an E-Strecken
N-S1	44.762	14,5%	27,03%
N-S2	31.567	10,3%	19,06%
O-W1	20.665	6,7%	12,48%
KI-NÜ	17.597	5,7%	10,63%
O-W3	10.112	3,3%	6,11%
N-W1	7.893	2,6%	4,77%
UN-WI	6.411	2,1%	3,87%
N-O1	5.226	1,7%	3,16%
KAS-UN	5.212	1,7%	3,15%
O-W2	5.096	1,7%	3,08%
BE-HH	4.877	1,6%	2,95%
BI-FR	3.489	1,1%	2,11%
M-W 1	2.687	0,9%	1,62%
Gesamtsumme	162.907	52,9%	100,0%

2.5.6.4 Reihenfolge der Ausbaustufen

Die vorliegende Auswertung nimmt, anders als die Ausführungen in Wietschel, Gnann et al. (2017), nicht Bezug auf die Verkehrsbelastung einzelner untersuchter Strecken. Die hier ausgewerteten Transportbeispiele sollen eine gleichmäßige Verteilung über die Fläche darstellen und berücksichtigen nicht Ballungsräume mit großer Bevölkerungszahl oder hohem Aufkommen an Industriebetrieben. Dennoch bestätigen sich die bereits veröffentlichten Ergebnisse: Der Ausbau des

eWay *N-S I* zwischen Hamburg und Karlsruhe wird in den zitierten Forschungsberichten als vorrangig genannt. Dieses deckt sich mit dem Wert in Tabelle 2.8. Als zweite Ausbaustufe wird der eWay *N-W I* zwischen Hamburg und Kreuz Kamen genannt, der in der Tabelle 2.8 nur mit rund 4,8% gelistet ist und damit laut der vorliegenden Auswertung nicht vorrangig ausgebaut werden müsste. Diese Strecke soll allerdings bis Ausbaustufe 4 um den Abschnitt *UN-WI* zwischen Unna und Wiesbaden verlängert werden. Der damit entstandene Nord-Süd-Korridor würde einen Anteil von rund 8,6% aufnehmen. Er könnte die Strecke *N-S I* entlasten und zudem den Verkehr aus dem Großraum Köln, dem angrenzenden Ruhrgebiet sowie den Verkehr aus den Niederlanden aufnehmen.

2.5.6.5 Auslastung in beiden Fahrtrichtungen

Die im Anhang befindliche Tabelle A.3 zeigt für die eWay-Strecken die Befahrung in den jeweils zwei Fahrtrichtungen. In nur einem Fall liegt dabei eine annähernd paarige Belastung vor: Die Touren ab PLZ-Gebiet 3 laufen 2.992 km über die Strecke *N-S I* und 3.108 km über die *S-N I* in entgegengesetzter Richtung. Eine Erklärung liefert der Blick auf die Deutschlandkarte in Abb. 2.17: In der Mitte liegt das PLZ-Gebiet 3 und dieses wird vom eWay *N-S I* in Nord-Süd-Richtung in zwei annähernd große Flächen geteilt. Das eröffnet die Möglichkeit einer etwa gleich großen Befahrung dieses eWay in beiden Richtungen. Alle anderen 1-stelligen PLZ-Gebiete berühren jeweils in Teilen die Außengrenzen Deutschlands. Da nur innerdeutsche Touren ausgewertet worden sind, wird es daher für jedes dieser Gebiete eher eine Präferenz weg von der Grenze geben. Diese verstärkt sich in dem Maße, wie nahe die innerhalb liegenden 2-stelligen PLZ-Gebiete an der Außengrenze liegen.

Würden die Transportbeispiele allerdings in der genau umgekehrten Richtung angelegt worden sein, dann würden sich die Werte für die Belegung der eWay-Strecken ebenfalls genau umkehren. Eine Erkenntnis im Hinblick auf den möglichen Ausbau der Elektrifizierung in nur einer Fahrtrichtung lässt sich demnach nicht ableiten.

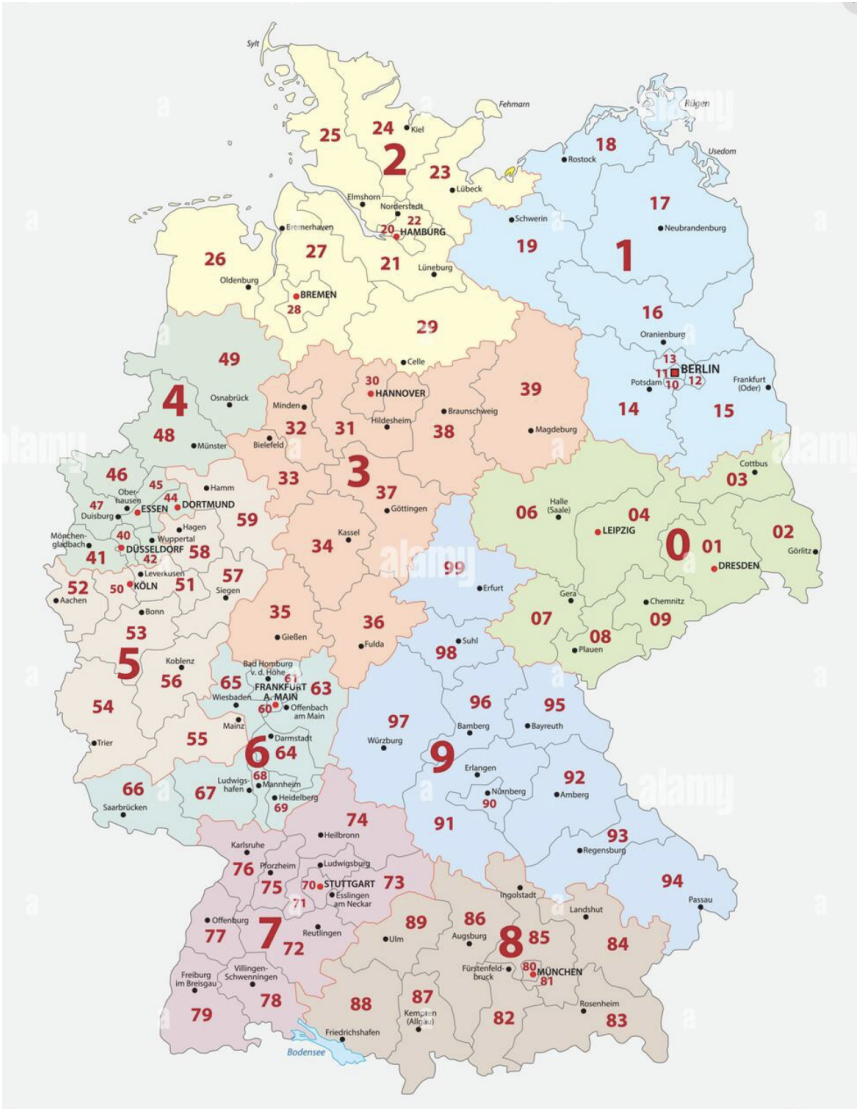


Abbildung 2.17: PLZ-Gebiete Deutschland (Quelle: www.alamy.com)

2.5.6.6 Besondere Eignung für ein Betriebsmodell

Wichtigstes Kriterium für eine hohe Eignung ist die LKW-Frequenz auf der Strecke. Dieses spricht für die Strecken *N-S 1* und mit etwas geringeren Belegungszahlen für die beiden Strecken *N-S 2* und *O-W 1*. Ein weiteres Kriterium ist die geografische Lage, was für Streckenabschnitte vor allem in der Mitte Deutschlands spricht, weil dort eine kontinuierliche Befahrung in beiden Richtungen möglich ist. Unter diesem Aspekt ist zusätzlich auch der eWay *KI-NÜ* von Bedeutung. Als drittes Kriterium kommt die kontinuierliche Belegung im Wochenverlauf hinzu. Die beiden Verbindungen *O-W 1* und *O-W 2* werden am Wochenanfang vermehrt in Richtung von Ost nach West befahren, am Wochenende verstärkt in der umgekehrten Richtung. Die Verkehrsrundschau (VR) berichtet am 14.11.2023 über die kilometerlangen Staus an der Grenze zu Polen, jeweils am Wochenanfang und am Wochenende, die durch die stichprobenartigen Kontrollen zum Aufgreifen illegaler Flüchtlinge noch verstärkt werden. Betroffen sind vor allem die BAB 2 (entspricht eWay *O-W 1*) und BAB 4 (entspricht eWay *O-W 2*).

Im Traktionsmodell müssen die Traktionsfahrzeuge in hoher Regelmäßigkeit in beiden Richtungen fahren, damit an den Umschlagpunkten abgestellte Trailer von dort abgezogen werden können. Bei nicht kontinuierlichem Aufkommen in beiden Richtungen müssten Traktions-SZM zeitweise ohne Auflieger eine Rückfahrt antreten.

Für die Einführung eines Traktionsmodells kommt, unter alleiniger Berücksichtigung der genannten drei Kriterien, zuallererst der Abschnitt zwischen Hannover und Mannheim auf dem eWay *N-S 1* in Frage.

2.5.6.7 Entfernung zum eWay

In Abb. 2.18 sind für den Traktionsverkehr die Teilstrecken für Zu- und Ablauf gestrichelt dargestellt. Diese Strecken muss ein Nahverkehrsfahrzeug zwischen seinem Einsatzgebiet und dem Umschlagpunkt an der Traktionsstrecke zurücklegen. Kurze Zu- und Abläufe sind dabei von Vorteil.

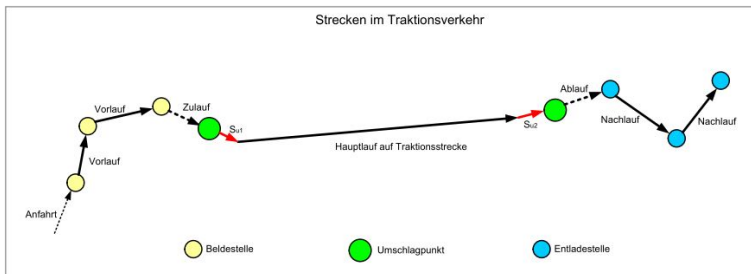


Abbildung 2.18: Zu- und Ablauf im Traktionsverkehr

Die Abb. 2.19 und 2.20 listen für die 277 Abgangsorte der Transporte aus Teil 1 (stochastische Verteilung) die durchschnittlichen Strecken, die bis zum Erreichen eines eWays zurückgelegt werden müssen. Es zeigen sich sowohl zwischen den 1-stelligen PLZ-Gebieten als auch innerhalb derer erhebliche Unterschiede. Gründe dafür wurden im Abschnitt 2.5.3 bereits angeführt. Die PLZ-Gebiete 3, 5 und 6 haben die größte Anzahl von Strecken kleiner 50 km und dort verlaufende eWay könnten unter dem Aspekt kurzer Zu- und Abläufe am besten in einen Traktionsverkehr eingebunden werden (siehe Abschnitt 3.2).

2.5.7 Gewichtung

Da in die vorangegangenen Auswertungen die Bedeutung jeder Quelle und jeder Senke mit dem gleichen Wert eingeht, wird nachfolgend eine Gewichtung der im ersten Schritt ermittelten Ergebnisse vorgenommen. Tabellen zur Wirtschaftskraft auf Ebene der Postleitzahlgebiete waren beim Statistischen Bundesamt nicht erhältlich, daher erfolgt die Gewichtung analog der Bevölkerungszahl in den PLZ-Gebieten. Diese konnten aus dem *Verzeichnis für Gemeindeanschriften* ermittelt werden, wo für jede deutsche Gemeinde Postleitzahl und Bevölkerungszahl genannt werden. Die in Tabelle 2.9 gezeigten Zahlen lassen zwei Aussagen zu:

1. Der kleinste Wert liegt im PLZ-Gebiet 0 und beträgt nur rund 57% des Wertes für das PLZ-Gebiet 7. Die Touren mit Abgangs- und Empfangsorten

im PLZ-Gebiet 0 werden damit einen deutlich geringeren Einfluss auf die Ermittlung der Rangfolge bezüglich eines Netzausbaus haben.

- Die Standardabweichung für die Anteile an der Gesamtbevölkerung beträgt nur 1,7% und tatsächlich entsprechen vier der zehn Gebiete fast exakt dem Mittelwert von 10,0%. Eine Gewichtung der Quellen und Senken analog der Bevölkerungszahl in den jeweiligen PLZ-Gebieten wird demnach nicht zu erheblichen Veränderungen führen.

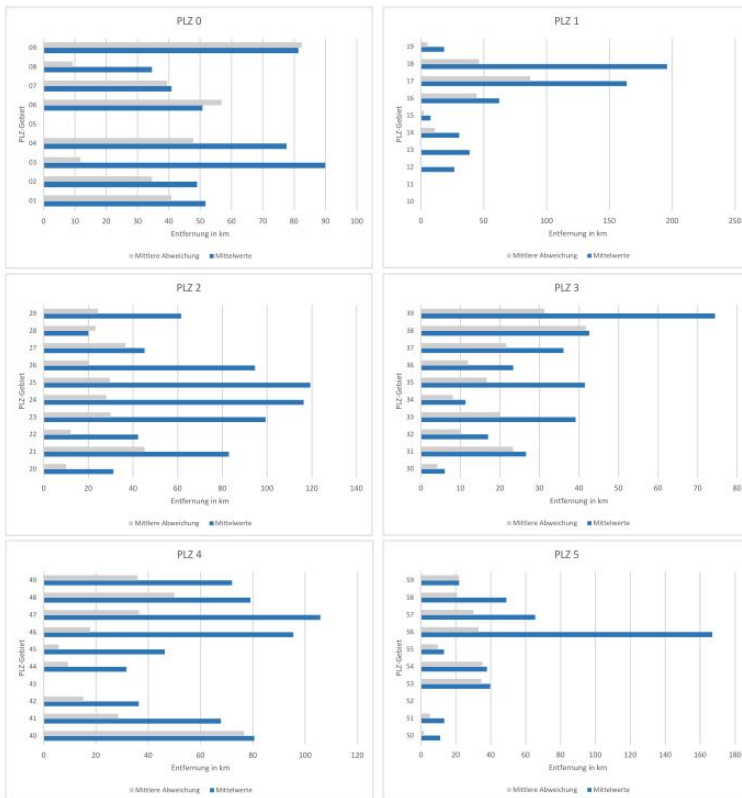


Abbildung 2.19: Entfernung zum nächsten eWay (PLZ-Gebiete 0 bis 5)

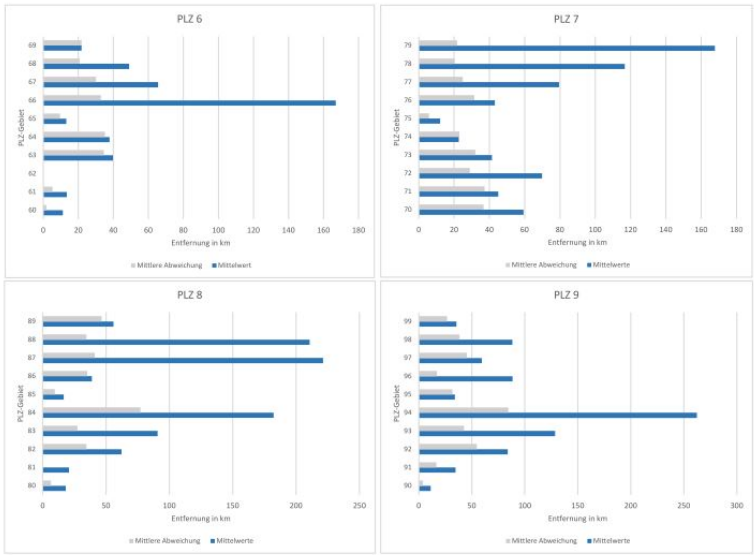


Abbildung 2.20: Entfernung zum nächsten eWay (PLZ-Gebiete 6 bis 9)

Tabelle 2.9: Bevölkerung und Flächen für Postleitzahlgebiete

PLZ-Gebiet	Bevölkerung Gesamt	Anteil an Gesamt	Fläche [km²]	Bevölkerung je km²
0	6.515.822	7,5%	39.573	165
1	7.288.407	8,4%	47.726	153
2	8.914.982	10,3%	43.896	203
3	8.863.899	10,2%	46.447	191
4	10.353.175	11,9%	20.365	508
5	9.262.230	10,7%	28.928	320
6	7.848.993	9,0%	17.557	447
7	11.503.414	13,2%	39.485	291
8	8.983.823	10,3%	41.765	215
9	7.287.311	8,4%	49.699	147
	86.822.056	100%	375.439	231
am 31.12.2021 (Jahr) auf Grundlage des Zensus 2011				
Quelle: Statistische Ämter des Bundes und der Länder				
Anschriften der Gemeinden und Städte				

Tatsächlich zeigt die Tabelle 2.10 nur wenige Verschiebungen:

- 4 E-Strecken behalten die gleiche Platzierung. Dazu gehören die zwei vorderen Plätze.
- 6 E-Strecken gehen um je 1 Stelle nach vorne oder hinten
- 2 E-Strecken gehen um je 2 Stellen nach vorne oder hinten und 1 E-Strecke rückt um 4 Stellen nach hinten. Bei allen handelt es sich nur um sehr geringe prozentuale Änderungen ihrer Anteile.

Tabelle 2.10: Rangfolge der E-Strecken ohne und mit Gewichtung

Name der E-Strecken	ohne Gewichtung		mit Gewichtung		Verschiebung der Rangfolge
	Anteil an E-Strecken	Rangfolge ohne Gewichtung	Anteil an E-Strecken	Rangfolge mit Gewichtung	
N-S1	27,03%	1	27,40%	1	0
N-S2	19,06%	2	15,97%	2	0
O-W1	12,48%	3	12,31%	4	-1
KI-NÜ	10,63%	4	13,37%	3	1
O-W3	6,11%	5	5,54%	5	0
N-W1	4,77%	6	3,58%	10	-4
UN-WI	3,87%	7	4,41%	6	1
N-O1	3,16%	8	3,80%	7	1
KAS-UN	3,15%	9	3,67%	9	0
O-W2	3,08%	10	3,77%	8	2
BE-HH	2,95%	11	1,80%	13	-2
BI-FR	2,11%	12	2,42%	11	1
M-W 1	1,62%	13	1,96%	12	1

Damit behalten die ohne Gewichtung vorgenommenen Aussagen ihre Gültigkeit.

3 **Entwicklung eines Betriebskonzeptes unter Nutzung des eHighway**

Bevor es in den folgenden Abschnitten um die Beschreibung von Betriebskonzepten des Güterkraftverkehrs und deren Bezug zum eHighway geht, erfolgt eine Klärung der Begriffe Geschäftsmodell und Betriebsmodell sowie eine Beschreibung des Marktumfelds mit den Faktoren Frachterlöse und LKW-Maut.

Definitionen

Laut Jodlbauer (2020) ist ein **Geschäftsmodell** eine abstrakte, strukturierte sowie vereinfachte Darstellung eines Unternehmens. Es muss eine leicht verständliche Geschichte sein, die erklärt, wie ein Unternehmen Nutzen für Kunden schafft und dabei selbst Geld verdient. Ein Geschäftsmodell beantwortet dabei die nachfolgenden vier Hauptfragen:

1. Wer sind unsere Kunden?
2. Was tun wir unserem Kunden Gutes (Schaffung von Mehrwert für den Kunden)?
3. Wie verdienen wir damit Geld?
4. Wie erbringen wir unsere Leistungen, Produkte und Dienstleistungen?

Wietschel, Gnann et al. (2017, S 217) führen folgende Definition ein: „Ein Geschäftsmodell beschreibt das Grundprinzip, nach dem eine Organisation Werte

schaft, vermittelt und erfasst. Es ist ein Konzept, das die Logik, nach der ein Unternehmen seine Gewinnerzielungsabsicht genau umsetzt, erklärt werden kann“. Zur Verdeutlichung würde ich diese Definition wie folgt umformulieren: „Ein Geschäftsmodell beschreibt das Grundprinzip, nach dem eine Organisation Werte schafft, vermittelt und erfasst. Es ist ein Konzept, das als die Logik, nach der ein Unternehmen seine Gewinnerzielungsabsicht genau umsetzt, erklärt werden kann“.

Im Sinne beider Definitionen ist das Geschäftsmodell des Güterkraftverkehrs das Erbringen von Transportleistungen mit Lastkraftwagen. Im Falle des gewerblichen Güterkraftverkehrs mit dem Ziel der Gewinnerreichung durch Rechnung an Dritte, im Falle des Werkverkehrs als Dienstleistung für das eigene Unternehmen zur Unterstützung der Gewinnerreichung desselben. Vor allem innerhalb des gewerblichen Güterkraftverkehrs kann das generelle Geschäftsmodell in unterschiedlichen **Betriebsmodellen** oder **Betriebskonzepten** ausgeführt werden.

In den untersuchten Quellen finden sich im Zusammenhang mit dem System eWay, oder allgemeiner, Electric Road System (ERS), nur wenige Einlassungen zu Geschäftsmodellen. Die Autoren Bernecker et al. (2020) von der Hochschule Heilbronn überschreiben ihre Studie mit dem Titel *Business Models, Ownership, and Financing Strategies* und stellen in der Abbildung auf Seite 9 den *transport market* mit den Teilnehmern *transport buyer (shipper)*, *dispatcher (freight forwarder)* und *carrier* als einen von verschiedenen *sub-markets* dar. Im Kapitel 4 werden ab Seite 24 die Rollen der Teilnehmer am ERS und deren Beziehungen untereinander angesprochen, Betriebsmodelle der *road users* werden aber nicht beschrieben. Wietschel, Gnann et al. (2017) beschreiben ab Seite 167 den *Traktionsdienstleister* als ein mögliches Geschäftsmodell anhand der zwei Autobahnstrecken von Hamburg nach Wuppertal und von Frankfurt nach Aachen.

Marktumfeld

Wesentliche Unterscheidungen im Zusammenhang mit dem Gütertransport auf der Straße nennen die zwei folgenden Begriffspaare:

- Gewerblicher Güterkraftverkehr – Werkverkehr
- Nahverkehr – Fernverkehr

Die Unterscheidungen *Gewerblicher Güterkraftverkehr* versus *Werkverkehr* und *Nahverkehr* versus *Fernverkehr* stammen aus dem Güterkraftverkehrsgesetz (GüKG), das Gültigkeit hat für alle Fahrzeuge und Fahrzeuggespanne mit einem zulässigen Gesamtgewicht von über 3,5 Tonnen und sind wesentlich für die Überlegungen in dieser Arbeit.

Gewerblicher Güterkraftverkehr ist die „geschäftsmäßige oder entgeltliche Beförderung mit Kraftfahrzeugen“ und ist erlaubnispflichtig.

Werkverkehr ist „Güterkraftverkehr für eigene Zwecke eines Unternehmens“ und ist nicht genehmigungs- aber meldepflichtig.

Zum **Nahverkehr** zählt man laut GüKG die genehmigungsfreien Transporte innerhalb einer 50 Kilometerzone.

Von **Fernverkehr** wird im Speditionsalltag, anders als im GüKG, erst ab 150 km Transportentfernung gesprochen. Dazwischen liegt der, allerdings gesetzlich nicht genau definierte, Regionalverkehr.

Prinzipiell können die identischen Fahrzeuge eingesetzt und die gleichen Straßen befahren werden, und dennoch gibt es im Hinblick auf den eWay gravierende Unterschiede:

- Im Werkverkehr sind die durchschnittlichen Transportentfernungen je Entfernungsklasse zwar nicht wesentlich geringer als im gewerblichen Güterverkehr, der Anteil des Nahverkehrs aber laut Tabelle 3.1 deutlich höher. In Göckeler, Hacker et al. (2020) werden Transporte im Werkverkehr mit kürzer als 100 km angenommen und gar nicht der Kategorie Fernverkehr zugerechnet. Die Chancen, einen elektrifizierten Straßenabschnitt zu befahren, sind demnach geringer.
- Im Werkverkehr werden, mehr als im Gewerblichen Güterkraftverkehr, Spezialfahrzeuge (z.B. Kipper, Kräne) eingesetzt, die sich bauartbedingt und durch das Einsatzumfeld nicht für die Ausrüstung mit Pantografen eignen.

- Im Nahverkehr, egal nach welcher Definition, sind die Transportentfernungen generell gering und damit auch die Chancen, einen eWay zu erreichen.

Tabelle 3.1: Marktanteile und Beförderungsweiten

Marktanteile und durchschnittliche Beförderungsweiten der Güterverkehrswege						
Verkehrszweig	Gütermenge in Mio. t		Gütermenge in Mio. t		Ø Entfernung in km	
	2000		2013		2013	
	Gewerblicher Verkehr	Werkverkehr	Gewerblicher Verkehr	Werkverkehr	Gewerblicher Verkehr	Werkverkehr
Fernverkehr	396.5	123.2	544.7	73.1	316	267
Anteil an gesamt	25.8%	8.5%	25.3%	9.5%		
Regionalverkehr	306.6	251.6	503.6	159.4	90	87
Anteil an gesamt	19.9%	17.3%	23.4%	20.8%		
Nahverkehr	835.8	1080.1	1106.2	535.1	19	17
Anteil an gesamt	54.3%	74.2%	51.3%	69.7%		
Gesamttonnage	1,538.9	1,454.9	2,154.5	767.6		
	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%		

Quelle: BGL Verkehrswirtschaftliche Zahlen (VWZ) 2014/2015 Seite 37

Im gewerblichen Güterkraftverkehr haben sich unter den zuvor beschriebenen gesetzlichen Rahmenbedingungen Betriebsmodelle entwickelt, die im Kapitel 3 beschrieben werden. Dazu gehören seit langem existierende Modelle wie der Trampverkehr und solche, die sich erst später, teilweise im Zuge des Internethandels, etabliert und ausgeweitet haben, wie vor allem der Systemverkehr. Göckeler, Hacker et al. (2020) unterscheiden in Tabelle 3.2 drei Kategorien und sieben Einsatzprofile.

Wietschel, Gnann et al. (2017) beurteilen in der bereits mehrfach zitierten Machbarkeitsstudie die Eignung für den eWay und kommen unter der Überschrift *Produkte des LKW-Fernverkehrs* zu folgender Einteilung:

- Stückgutssystemverkehr
- Ladungsverkehr
- Hub-Verkehre KEP

- Spezialtransporte

Tabelle 3.2: Einsatzprofile im Fernverkehr nach Göckeler et al. (2020)

Kategorie	Einsatzprofile	Güterstruktur	Anwendungsbeispiel	Fahrzeuge (überwiegend)
Stückgut-/ Systemverkehre	Express- und Paketdienste	Pakete	▪ Hauptläufe zwischen Depots	▪ N2 ▪ N3
	Hubverkehre	Pakete, Sperrgut, Palettenware	▪ Hauptläufe zwischen Ausgangsdepots und Zentralhub ▪ Hauptläufe zwischen Zentralhub und Empfangsdepots	▪ N2 ▪ N3
(Teil-)Ladungsverkehre	Beschaffungslogistik	Teile, Pakete, Palettenware	▪ Direkttransporte zwischen Absender und Empfänger (Zulieferer und Verlader)	▪ N3
	Distributionslogistik	Lebensmittel, Non-food Konsumgüter	▪ Hauptläufe auf der Straße innerhalb der Kühlkette	▪ N2 ▪ N3
Sonder-/Spezialfahrten	Kurierdienste	Pakete, Teile, sonstige Ware	▪ Sonderfahrten für die Produktionsversorgung	▪ N2 ▪ N3
	Gefahrguttransporte	ätzende/oxidierende/giftige/reizende Waren und Stoffe	▪ ADR-spezialisierte KMU, die Landverkehre zu Häfen/Bahnhöfe/Flughäfen ermöglichen	▪ N2 ▪ N3
	Großraum- und Schwertransporte	u.a. Stahlträger, Maschinen, Windradteile, Fahrzeuge	▪ Transport von Anlagen ▪ Maschinenumzüge	▪ N3

Einen Hinweis darauf, welche Fraktionen von Fahrzeugarten und Gewichtsklassen für den Einsatz auf dem eWay in Frage kommen könnten, geben die aus der Shell Studie Adolf, Balzer et al. (2016) stammende Gewichtsklassen-Einteilung in Tabelle 3.3 und die Abb. 3.1 nach Angaben des Kraftfahrt-Bundesamts (KBA).

Tabelle 3.3: Einteilung der Fahrzeugklassen nach zGG

Fahrzeugklassen Einteilung nach zulässigem Gesamtgewicht (zGG)

Gewichtsklasse GK1:	0	bis	3.5 t zGG
Gewichtsklasse GK2:	3.51	bis	7.5 t zGG
Gewichtsklasse GK3:	7.51	bis	12 t zGG
Gewichtsklasse GK4:	12.1	bis	26 t zGG
Gewichtsklasse GK5:	26.1	bis	32 t zGG
Gewichtsklasse SZM:		bis	40 t zGG

Quelle: Shell-Studie 2016

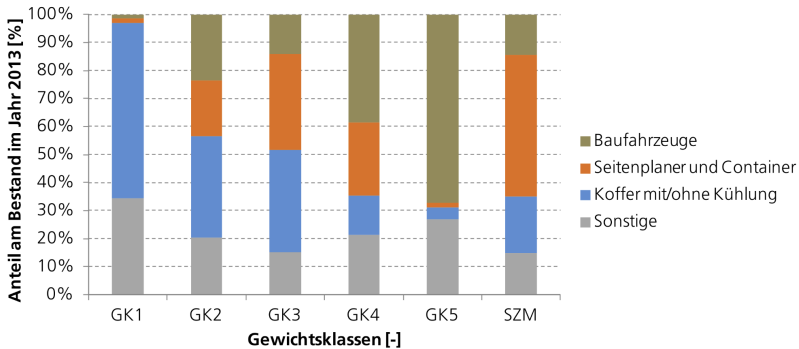


Abbildung 3.1: Einteilung nach Gewichtsklassen und Aufbauten

Wesentlichen Einfluss auf das Entstehen und die folgende Entwicklung von Betriebsmodellen im Güterkraftverkehr nach dem 2. Weltkrieg waren, neben den in dieser Arbeit nicht beschriebenen Faktoren Tarifbindung, Liberalisierung und Internationalisierung, weitere Faktoren:

- Erfindung des Containers sowie die Einführung genormter Wechselbrücken und deren Verwendung beim Gütertransport auf der Straße
- Standardisierung von Lademitteln, insbesondere Europalette und Eurogitterbox
- Anpassung der LKW-Ladeflächen auf Palettenbreite
- Einführung von Speditionssoftware

Bevor im Folgenden untersucht wird, welche Betriebsmodelle sich prinzipiell für das System eWay eignen, müssen Aussagen auf der Erlös- und der Kostenseite erfolgen.

Frachterlöse

Eingangs dieses Kapitels wurde das Geschäftsmodell des Güterkraftverkehrs bereits definiert: Es geht um das Erbringen von Transportleistungen mit dem Ziel

der Gewinnerreichung. Im gewerblichen Güterkraftverkehr wird das durch möglichst hohe Frachterlöse erreicht. Im Werkverkehr durch die Erbringung solcher Frachten im Selbsteintritt und damit durch die Vermeidung von Mittelabfluss an Dritte. Frachten werden mit wenigen Ausnahmen (LKW-Einsatz im Stunden-



Abbildung 3.2: Standardisierte Lademittel Bahn-Gitterbox und Euro-Palette (Quelle: DB-Schenker und EPAL)

oder Tagessatz) in Abhängigkeit von der Menge des Transportgutes (Gewicht oder Lademeter) und der Transportstrecke ermittelt. Dazu werden in festen Kundenbeziehungen sogenannte Haustarife vereinbart, in denen für bestimmte Touren entweder Pauschalfrachten oder Frachtsätze gelistet sind. Handelt es sich um Komplettladungen, meist mit dem aus dem Englischen kommenden Full Truck Load (FTL) bezeichnet, der Lastzug ist nach Gewicht oder Ladefläche komplett ausgelastet, dann ist die Fracht nur abhängig von der Transportentfernung, und ein Frachtsatz PF_{ftl} ergibt durch Multiplikation mit der Hauptlaufentfernung S_{hl} den Frachterlös für die Tour. Handelt es sich um Teilladungen, dann werden in Abhängigkeit von der Transportentfernung Frachtsätze für Größenklassen (Gewicht oder Lademeter) definiert. Durch Multiplikation des Frachtsatzes mit der Größe der Teilpartie (Gewicht oder Lademeter) erhält man die Fracht für die Sendung.

Touren beginnen mit der Anfahrt zur ersten Beladestelle und enden nach beendeter Entladung an der letzten Endladestelle. Sie umfassen also Lenkzeiten t_{lenk} , Wartezeiten an Beladestellen t_{bela} , an Entladestellen t_{entla} und möglicherweise weitere Hilfs-, Arbeits- und Bereitschaftszeiten t_{helf} sowie vorgeschriebene Pausenzeiten.

Die Lenkzeiten addieren sich aus der Anfahrtszeit, den Zeiten für Beladeverkehr, für Hauptlauf und Entladeverkehr. Die dafür eingesetzten Lenkzeiten hängen immer von der durchschnittlichen Geschwindigkeit und der Wegstrecke ab. Beim Be- und Entladeverkehr ist zusätzlich noch die Anzahl der Stellen und die durchschnittliche Verweildauer je Stelle von Bedeutung. Sind deren Anzahl, Verweildauer und Distanz zur nächsten Stelle groß, entfällt ein großer Anteil der täglichen Arbeitszeit auf diese Tätigkeiten, und entsprechend klein ist die für den Hauptlauf verbleibende Zeit. Die mathematischen Zusammenhänge und den Einfluss auf die Frachterlöse beschreibt das Kapitel 4.

Zu den Hilfs- und Bereitschaftszeiten t_{helf} zählen:

- Öffnen und Schließen des Trailers
- Ladungssicherung
- technische Arbeiten am Fahrzeug
- Abfahrkontrolle, Tanken, Luftdruck prüfen
- Ladepapiere ausfüllen, Scannen, Übermitteln
- Kommunikation mit der Disposition

Zu den Wartezeiten t_{wart} zählen:

- Wartezeiten bei Beladung t_{bela}
- Wartezeiten bei Entladung t_{entla}

Die Wartezeiten an Be- und Entladestellen können dabei unterschiedlich bewertet werden. Kennt der Fahrer die genauen Zeiten, dann kann er die Wartezeit als Pause werten. Sitzt er aber auf Abruf in seinem Fahrzeug und weiß nicht, wann

er gegebenenfalls von der Rampe wegfahren muss, dann handelt es sich um Arbeitszeit. Auf jeden Fall bleibt, je nach Umfang der sonstigen Arbeitszeiten, unter Berücksichtigung der höchstzulässigen täglichen Arbeitszeit t_{zuarb} nur ein bestimmter Teil für die Lenkzeiten übrig.

Teilpartien bringen je Tonne oder je Lademeter eine höhere Fracht als Komplettpartien. Je kleiner die Teilpartie, je höher ist der Frachtsatz. Diese Systematik verfolgen übliche Haustarife noch immer: In Abhängigkeit von der Sendungsgröße (Gewicht oder Lademeter) werden auf Basis des Frachtsatzes für die Komplettpartie prozentuale Aufschläge gemacht, um die Frachtsätze für Teilpartien zu fixieren. Diese können sehr unterschiedlich sein: Hat eine Spedition ein sehr großes Sendungsaufkommen innerhalb des Versandgebietes und auch innerhalb des Zielgebietes, dann können die Aufschläge gering ausfallen, da Verlade- und Entladestellen in geringer Entfernung liegen und für Be- und Entladeverkehr relativ wenig Zeit aufzuwenden ist. Vor allem aber besteht eine große Wahrscheinlichkeit, den Lastzug mit passenden Teilpartien auslasten zu können.

Das mathematische Modell setzt an dieser Stelle einen Optimierungslauf ein und ermittelt die optimale Zahl von Be- und Entladestellen unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Frachtsätze.

Eine vereinbarte Fracht erhält der Spediteur vom Frachtzahler in der Regel (siehe Ausnahmen) unabhängig davon, für welches Betriebsmodell er sich entscheidet. Eine bestimmte Tour bringt also denselben Frachterlös, egal ob im Trampverkehr oder z.B. im Traktionsverkehr und unabhängig davon, welche Fahrzeuge eingesetzt werden. Es gibt jedoch Ausnahmen:

- Frachtzahler schreibt Einsatz von regenerativem Antrieb vor.
- Frachtzahler schreibt verkürzte Laufzeit vor und verlangt Doppelbesatzung.
- Frachtzahler schreibt Einsatz von Kombiverkehr vor.

Damit bleiben dem Spediteur mit Blick auf möglichst geringe Betriebskosten zumindest einige Möglichkeiten:

- Stückgüter wird er in den Systemverkehr eines Stückgutnetzes einspeisen
- Teilladungen, zu denen es keine passenden anderen Sendungen gibt, könnte er in das Teilladungsnetz *ELVIS* einleiten
- Komplettladungen können, mittels Selbsteintritt oder nach Vergabe an einen Frachtführer, im Trampverkehr oder im Begegnungsverkehr transportiert werden
- Komplette Wechselbrücken oder Trailer können vom nächsten Kombibahnhof zum Kombibahnhof in der Nähe des Zielortes transportiert werden.

LKW-Maut

Einen immer größeren Anteil an den Fahrzeugeinsatzkosten nimmt die LKW-Maut ein, und im Hinblick auf die Einführung regenerativer Antriebe im Güterkraftverkehr kommt der Ausgestaltung zukünftiger Mautsätze große Bedeutung zu.

Der Ausbau und die Erhaltung der Verkehrsinfrastruktur haben in der Zeit von 1970 bis 2000 nicht mit der allgemeinen Verkehrsentwicklung Schritt gehalten. Laut Hartwig und Marner (2005) sind die Investitionen, bezogen auf die in Personen- oder Tonnenkilometer, in diesem Zeitraum sogar gesunken. Derselben Quelle ist zu entnehmen, dass eine Investition in Höhe von 1 Mrd. Euro in die Verkehrsinfrastruktur während der folgenden 30 Jahre einen jährlichen Wohlfahrtsgewinn von 173 Millionen Euro bringt, einen Gesamteffekt also von 5,2 Mrd. Bedingt durch diese Erkenntnis und vor dem Hintergrund der dauernden finanziellen Not öffentlicher Haushalte wurde im Jahr 2000 die Pöllmann-Kommission gegründet. Diese sollte dem Bund konkrete Vorschläge für die zukünftige Finanzierung seines Straßen-, Schienen- und Wasserstraßennetzes machen. Die wichtigsten Vorschläge der Kommission, bezogen auf das Straßennetz, lauten:

- Die Autobahnen und Bundesstraßen sollen zukünftig zumindest teilweise durch streckenbezogene Nutzergebühren finanziert werden,

- diese Gebühren sollten neutral erhoben werden, also durch entsprechende Entlastungen bei Kfz- und Mineralölsteuer kompensiert werden,
- sie sollen zweckgebunden erhoben werden, also ausschließlich dem Bau und Erhalt von Straßen zufließen,
- neben dem Staat sollen sich auch Unternehmen an der Bereitstellung und dem Unterhalt öffentlicher Straßen beteiligen können.

Diese Loslösung der Finanzmittel, vom Steueraufkommen hin zur empfohlenen Gebührenfinanzierung, hätte laut Kommission den Vorteil, dass notwendige Investitionen dann nicht mehr von der jeweiligen Haushaltslage abhängig wären und mit Hinweis auf die aktuell schlechte Finanzlage verschoben werden könnten. Die Möglichkeit, Wirtschaftsunternehmen mit einzubeziehen, entsprach deren langjähriger Forderung nach Public Private Partnership (PPP).

Die Vorschläge der Pällmann-Kommission orientieren sich, wie Hartwig und Marner (2005) erläutern, ausschließlich an den Wegekosten und lassen damit die Möglichkeit außer Acht, die Maut auch mit Lenkungsmöglichkeit auszustatten. Das sehen Markwardt und Dittrich (2003) in ihrer Studie ähnlich: Würde man die Nutzergebühr nicht nur kilometerabhängig machen, sondern sie außerdem strecken- und zeitbezogen anlegen, dann könnten gleich mehrere positive Effekte eintreten:

- Nutzer könnten Straßenabschnitte mit hohen Mautsätzen meiden und auf eventuell längere Strecken mit niedrigeren Mautsätzen ausweichen,
- Nutzer könnten Streckenabschnitte an bekannten Stoßzeiten mit hohen Mautsätzen generell meiden und ihre Fahrten auf andere Tageszeiten oder sogar Wochenzeiten mit niedrigeren Kilometersätzen verlegen. Für zeitsensitive Fahrten wird das allerdings ausscheiden.
- Straßen würden, wenn auch nur in geringem Maße, gleichmäßiger belastet werden.

Diesen Erkenntnissen wurde mit dem Vorschlag des Europäischen Parlaments vom 10. März 2009 Rechnung getragen: Mautsätze sollen an mehreren Stunden am Tag gegenüber dem Basissatz Spreizungen von 175% bis 200% aufweisen, um eine sehr deutliche Lenkungswirkung zu entfalten. Dazu ist es bis heute nicht gekommen, möglicherweise auch wegen eines Umstands, auf den die Wirtschaftsuniversität Wien in Kummer et al. (2011) hingewiesen hatte: Wie sollen Transporteure so unterschiedliche Mautsätze im Vorhinein in ihre Kostenkalkulationen einbringen? Zudem könnten Betreiber von mautpflichtigen Strecken, egal ob Staat oder Privatunternehmen, erhöhte Mauteinnahmen in den Ausbau genau der Strecken mit hohem Mautaufkommen investieren. Darin liegt allerdings die Gefahr, dass in wenig befahrenen Strecken nicht mehr investiert wird und ganze, wenn auch nur schwach besiedelte und mit wenig Wirtschaftskraft ausgestattete Regionen, abgehängt werden könnten, was der staatlichen Fürsorgepflicht widerspräche. Im Falle der nicht rentablen Bahnstrecken hat man bei deren Stilllegung diesem Punkt untergeordnete Bedeutung beigemessen.

Im Jahr 2002 verabschiedete der Bundestag das Autobahnmautgesetz (ABMG) für schwere Nutzfahrzeuge, das aufgrund rechtlicher Einsprüche und technischer Probleme schließlich erst mit dem 1. Januar 2005 in Kraft trat. Das ABMG betraf zunächst nur das Befahren von Bundesautobahnen und wenigen stark frequentierten Bundesstraßen und galt für gewerblich eingesetzte LKW mit einem zGG ab 12 Tonnen. Die Mautsätze von 9 bis 14 Eurocent galten je Kilometer und waren nach Emissionsklassen und Achszahl gestaffelt.

Inzwischen wurde das ABMG durch das Bundesfernstraßemautgesetz (BFStrMG) abgelöst, und dieses ist mehrmals erweitert worden:

- alle Bundesstraßen sind aufgenommen worden,
- alle LKW ab 7,5 t zGG sind betroffen,
- Gewichtsklassen wurden zusätzlich eingeführt,
- die Mautsätze sind stark erhöht worden.

In mehreren Untersuchungen, zum Beispiel Markwardt und Dittrich (2003) oder Knieps (2006a) und Knieps (2006b) wird mit Verweis auf die vertane Chance, die Mautgesetzgebung mit Lenkungswirkung auszustatten, auf den volkswirtschaftlichen Schaden durch Staukosten hingewiesen. Die als positives Beispiel angeführte Express Lane in Kalifornien wäre in Deutschland aber sicher nur an sehr wenigen Stellen zu realisieren.

Fällig wird die LKW-Maut für in- und ausländische Fahrzeuge, wobei diverse Fahrzeuggruppen, wie z.B. Omnibusse, Fahrzeuge der Streitkräfte, der Straßenmeistereien oder Zirkusunternehmungen und weitere, ausgenommen sind. Ebenfalls von der Maut befreit sind elektrisch oder überwiegend mit Gas betriebene Fahrzeuge (BFStrMG, 2011).

Die Maut wird in Deutschland durch die Firma Toll Collect GmbH erhoben und an den Bundeshaushalt transferiert. Mautpflichtige Fahrzeuge können die Maut durch Einbuchung an Terminals entrichten, meist in Raststätten oder Tankstellen, oder durch Einbuchen im Internet. Die gebräuchlichste Art ist allerdings die Nutzung von On-Board-Units (OBU), die eine automatische Erfassung und Abrechnung erlauben. Solche OBU gibt es auch in anderen Ländern in Europa, sie sind allerdings nicht durchweg grenzüberschreitend einsetzbar.

Zur Harmonisierung der Wettbewerbsbedingungen innerhalb Europas hat sich die Bundesregierung mit dem Güterverkehrsgewerbe darauf geeinigt, zum Zeitpunkt der Mauteinführung die Kfz-Steuer für schwere LKW abzusenken und diverse Förderprogramme für Fuhrparkinnovationen aufzulegen. Ab 2009 wurde unter dem Namen *De-minimis-Beihilfen* ein weiteres Programm zur Mautkompensation aufgelegt, das aufgrund seiner Höhe von maximal 2.000 € je Nutzfahrzeug (Göckeler, Hacker et al., 2020) nicht mit der EU abgestimmt werden musste.

Die Einnahmen aus der LKW-Maut, in der Größenordnung von jährlich etwa 8 Milliarden Euro (Stand 2019), sollen der Finanzierung der Verkehrsinfrastruktur dienen, sie fließen zunächst aber in den gesamten Steuertopf und unterliegen somit der Verteilung durch den Bundesfinanzminister. Dieses war anfangs anders geplant und wird vor allem vom Transportgewerbe und dessen Verbänden immer wieder beklagt.

Durch die Staffelung der Mautsätze nach Schadstoffklassen hat sie immerhin eine Lenkungswirkung bezüglich Anschaffung und Einsatz der LKW. Im Zusammenwirken mit der Möglichkeit, über Leasingfirmen Verträge mit kurzen Laufzeiten zu realisieren, ist es den Fuhrparkbetreibern möglich, einen Großteil des ziehenden Fuhrparks in der günstigsten Emissionsklasse zu halten, und gleichzeitig damit Fahrzeuge mit dem günstigsten Treibstoffverbrauch einsetzen zu können. Und tatsächlich wird in einer Shell-Studie von Adolf und Balthasar (2010) festgestellt, dass sich, im Gegensatz zu allen übrigen Gewichtsklassen, das durchschnittliche Lebensalter der SZM seit 1990 verringert hat und jetzt bei unter fünf Jahren liegt.

Mautvermeidungsverkehre sind, seit der Integrierung der Bundesstraßen in das Netz mautpflichtiger Straßen, in Deutschland nicht mehr von Bedeutung, allerdings können immer noch Nachbarländer betroffen sein, wie z.B. Frankreich auf der anderen Rheinseite gegenüber der BAB 5 zwischen Karlsruhe und Müllheim/-Neuenburg.

In Krap (2005) wird schon 2005 die „un-endliche Geschichte der LKW-Maut“ beschrieben. Im Jahr 2020 setzte sich diese fort, als mit einem Urteil des Europäischen Gerichtshofs (EuGH) festgestellt wurde, dass die in der Vergangenheit erhobenen Mautsätze zu hoch sind. Transportunternehmen können sich demnach auf Rückerstattungen freuen, die allerdings nicht so hoch sein werden, weil die Kostenanteile für Luftverschmutzung zu niedrig eingepreist worden sind. Ab Dezember 2023 wird die CO₂-Klasse einbezogen und auch dadurch steigen die Mautsätze für eine SZM mit Schadstoffklasse Euro VI um rund 80%. Ab Juli 2024 werden auch die Fahrzeuge ab 3,5 t zGG mautpflichtig werden, und möglicherweise bricht damit ein ganzes Geschäftsfeld für überwiegend osteuropäische Frachtfirmen weg, die sich bisher über Transportbörsen Teilpartien einkaufen und diese im Direktverkehr ohne Mautbelastung befördern.

Laut Informationsblatt der SVG Frankfurt, im Anhang unter A.4, machen die Mautkosten für einen LKW im Fernverkehr im Jahr 2023 durchschnittlich 9,59% an den Gesamtkosten aus. Nach der Erhöhung um mehr als 80% rücken sie ab 2024 mit einem Anteil von dann mehr als 17% schon in die Größenordnung der Schmier- und Treibstoffkosten mit rund 25% Anteil.

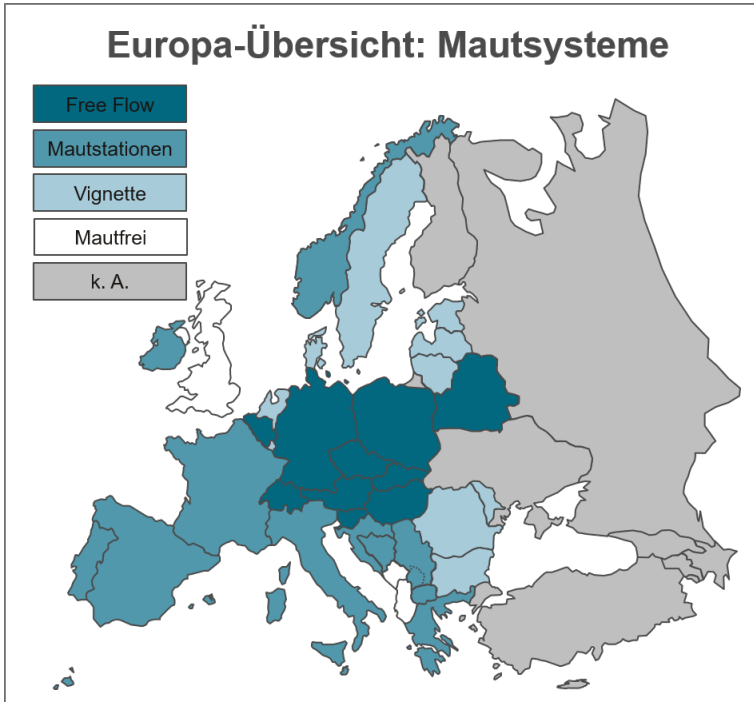


Abbildung 3.3: Mautsysteme in Europa (Quelle: impargo SVG)

Das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) preist das deutsche Mautsystem auf seiner Homepage als zukunftsweisend, allerdings hat es keiner unserer europäischen Nachbarn übernommen. Maut wird zwar annähernd überall erhoben, wie auf Abb. 3.3 gezeigt, allerdings unterscheiden sich die Mautsysteme in Höhe, in Art der Erfassung und in den Geltungsparametern.

Im Zusammenhang mit der Einführung des Systems eWay und dessen Markthochlauf wird der Festsetzung zukünftiger Mautsätze oder der generellen Mautbefreiung für HO-Fahrzeuge große Bedeutung zukommen, wenn es um die Finanzierung der Mehrkosten für die Elektrifizierung der HO-Fahrzeuge geht. Es geht darüber hinaus auch um Rechtssicherheit und langfristige Planungshorizonte für die Betreiber von zunächst geförderten Fahrzeugen mit regenerativen Antrieben. Der

plötzliche Stopp der Förderung für den Ankauf von E-Autos im Dezember 2023 und der plötzliche Wegfall der Mautbefreiung im Herbst 2023 für die HO-LKW auf dem eWay^{BW} sind dabei sicher nicht hilfreich.

Nach den vorausgegangenen Erklärungen werden nun in den folgenden Abschnitten mögliche Betriebsmodelle des Güterkraftverkehrs beschrieben, auch mit Blick auf deren Eignung für das System eHighway.

3.1 Trampverkehr

Der Name Trampverkehr stammt, wie auch der Name Linienverkehr, aus der Seeschifffahrt. A. Marx (1967) bezeichnet ihn mit den Attributen *Gelegenheitsverkehr*, *Bestellverkehr*, *Bedarfsverkehr* und jedenfalls *nicht planmäßiger Verkehr*. Der Trampverkehr ist auch dadurch gekennzeichnet, dass die Rückladung, oder allgemeiner, die Anschlussladung, nicht an den Abgangsort des vorausgegangenen Transports geht, wie in Abb. 3.4 exemplarisch dargestellt. Dabei versuchen die Disponenten eine geeignete Anschlussladung in möglichst geringer Entfernung von der letzten Entladestelle zu finden, wobei es Präferenzen für das Zielgebiet gibt: Dieses soll in einer Region liegen, in der die Möglichkeit besteht, eine weitere Anschlussladung zu bekommen. Solche Ladungen können aus der eigenen Kundschaft, aus eigenen Niederlassungen oder von befreundeten Spediteuren stammen, oder es handelt sich um Transportaufträge anderer Speditionen, die man über Laderaumverteilungsstellen, Frachtenvermittler oder Internetbörsen akquiriert. In der Regel wird versucht, das Fahrzeug zum Wochenende wieder an den Firmensitz oder an den Wohnsitz des Fahrers zu disponieren. Der Lastzug wird dabei von ein und demselben Fahrer gefahren und Anhänger oder Sattelauflieger werden üblicherweise nicht getauscht. Laut A. Marx (1967) war der Trampverkehr zunächst die überwiegende Betriebsform des Güterkraftverkehrs, bevor Linienverkehr und vor allem Systemverkehre an Bedeutung gewannen.

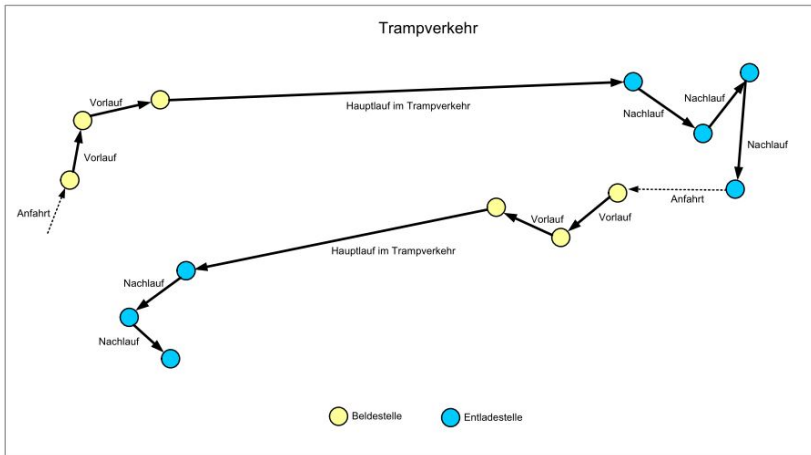


Abbildung 3.4: Trampverkehr

Apfelstädt (2017) weist auf Merkmale des Trampverkehrs hin, die maßgeblich für die sehr niedrigen Renditen vieler Transportunternehmen sind:

- „Planungsprozess auf Einzel-Auftragsebene“, maximal mit Blick auf die nächste Anschlussladung
- „Produktionsverfahren mit beispiellosem Mangel an Produktivität und Effizienz“, weil das Produktionsmittel an 11 von 24 Stunden steht und nicht genutzt wird
- „Geschick, Erfahrung und nicht selten schlichtes Glück des Disponenten spielen eine große Rolle“

Die Zielsetzung der Disponenten, möglichst hohe Frachterlöse zu erzielen, unterliegt folgenden Einflüssen und Randbedingungen:

- die Aufnahme mehrerer Teilpartien zu einer Ladung verspricht hohe Fracht, verbraucht aber Lenk- und Arbeitszeit,

- Komplettladungen bringen, vor allem auf sogenannten Rennstrecken, nur geringe Erlöse, sind aber besser planbar. Außerdem stellen sie geringere Anforderungen an die Fahrer, was Sprachkenntnisse und den Umgang mit Hindernissen an Be- und Entladestellen anlangt,
- vorgeschriebene Zeitfenster für Be- und Entladung schränken die Auswahl von Teilpartien stark ein und erschweren die Aufnahme von geeigneten Anschlussladungen,
- das Fahrzeug muss zur Ladung passen: Tank, Silo, Kipper, Kühler, Coilmulde für Bleche und Spaltbänder, Jolodaschienen für Papierrollen,
- die zulässige tägliche Arbeitszeit und die zulässige tägliche Lenkzeit sind die hauptsächlich begrenzenden Faktoren.

H. Kopfer und Pankratz (1999) sehen im Zusammenfassen von passenden Teilpartien zu einer LKW-Ladung ebenfalls die Möglichkeit, hohe Frachterlöse zu erzielen und gehen auf die Degression von Frachtsätzen bei zunehmender Sendungsgröße ein. In H. Kopfer, H. W. Kopfer et al. (2008) wird auf einen Unterschied bei der Disposition zwischen Selbsteintritt und Fremdvergabe verwiesen. Tatsächlich machen Disponenten diesen Unterschied normalerweise nur dahingehend, dass der eigene Fuhrpark möglichst nur in Zielgebiete disponiert wird, wo eine passende Rückladung vorliegt oder erwartet werden kann. Ansonsten werden dieselben Grundsätze befolgt, da die eingesetzten Subunternehmer denselben Forderungen unterliegen wie der eigene Fuhrpark: Einhaltung vorgegebener Termine, Meldung bei Verzögerungen, Dokumentation von Anlieferung, Lademitteltausch und gegebenenfalls von Schäden.

Da der Frachterlös im Fernverkehr typischerweise mit der Transportentfernung korreliert, wird versucht, unter Einhaltung der gesetzlichen Bestimmungen für den Einsatz des Fahrpersonals innerhalb einer Schichtzeit eine möglichst weite Transportentfernung zu überbrücken, um so zu einem hohen Tageserlös zu kommen.

Laut Müller und Klaus (2009) arbeiten die größten europäischen Transporteure mit großen Teilen ihrer Flotten, die jeweils mehr als 1.000 ziehende Einheiten umfassen, tatsächlich nach dem oben beschriebenen Modell des Trampverkehrs. In derselben Quelle wird auch der Unterschied zur Entwicklung in den USA aufgezeigt, wo sich nach der Liberalisierung einige mittelständische Transporteure, trotz auch dort stark fallender Frachtpreise, zu wahren Transportgiganten mit Milliardenumsätzen entwickelt haben. Diese arbeiten nach dem Modell *Advanced Truckload Firm* und organisieren die Abläufe nicht Transport für Transport, sondern nach den Prinzipien von industrieller Produktion, auf Basis ihrer hohen Zahl an Transportaufträgen und mittels komplexer Softwaresysteme mit Vernetzung möglichst vieler an der Transportkette Beteiligter. Auch in Hacker, Blanck et al. (2020, S 74) wird von Bestrebungen berichtet, den Güterverkehr zu „industrialisieren“. In vielen Speditionen werden die genannten Maßnahmen, wie z.B. Mehrschichtbetrieb oder der Wegfall fester Zuordnung von Fahrer zu einem bestimmten LKW, heute bereits umgesetzt.

3.1.1 Short Haul

Hierbei handelt es sich um einen Transport, dessen Abwicklung innerhalb nur einer Schichtzeit erfolgen kann. Unter einer Schichtzeit versteht man die Zeit zwischen zwei vorgeschriebenen Tagesruhezeiten von normalerweise 11 Stunden. Die Einsatzmöglichkeiten der Fahrer innerhalb einer Schichtzeit werden durch die zulässige tägliche Arbeitszeit und die zulässige tägliche Lenkzeit begrenzt.

Ein Transport beginnt mit der Anfahrt zur ersten Ladestelle und endet mit der Entladung an der letzten Entladestelle. Die Abb. 3.4 zeigt zwei solcher Transporte mit jeweils mehreren Be- und Entladestellen. Bei einer Komplettladung gibt es nur 1 Beladestelle und 1 Entladestelle.

Die beiden Diagramme in Abb. 3.5 zeigen, bei ansonsten unveränderten Parametern, die Ergebnisse eigener Berechnungen und den Einfluss der Bedingungen beim Be- und Entladeverkehr auf die Frachterlöse. Lange Verweildauern zeigen

in beiden Diagrammen niedrigere Frachten. Längere Distanzen zwischen Belade- und/oder Entladestellen bedeuten ebenfalls sinkende Frachterlöse.

3.1.2 Long Haul

Die Abb. 3.6 zeigt schematisch eine Zweitagesfahrt, die über deutlich längere Distanzen ablaufen kann, wie im internationalen Verkehr durchaus üblich. Unterbrochen durch 2 vorgeschriebene Tagesruhezeiten von in der Regel jeweils 11 Stunden, können zwei Tageslenkzeiten und zwei tägliche Arbeitszeiten verbraucht werden, während der Aufwand für Be- und Entladung aber nur einmal am Beladetag und einmal am Entladetag anfallen. Im Gegensatz zum Short Haul werden Disponenten hier weitere Distanzen zwischen Ladestellen und zwischen Abladestellen akzeptieren, dies unter der immer gleichen Zielsetzung, den Lastzug nach Ladegewicht oder Lademeter möglichst hoch auszulasten. Bei größeren Distanzen zwischen den Be- bzw. den Entladestellen kann man mit einer etwas höheren Durchschnittsgeschwindigkeit beim Be- und Entladeverkehr rechnen. Die Geschwindigkeit auf dem Hauptlauf wird sich leicht erhöhen können aber immer unterhalb der maximal zulässigen Höchstgeschwindigkeit auf europäischen Autobahnen liegen.

3.2 Traktionsverkehr

Wenn Transporte im Trampverkehr abgewickelt werden, wie in Abb. 3.4 und Abb. 3.6 dargestellt, dann ist daran nur 1 LKW beteiligt. Werden solche Touren im Traktionsverkehr durchgeführt, dann sind es mindestens drei Fahrzeuge. Dabei wird die Gesamtstrecke, wie in Abb. 3.8 gezeigt, in drei Abschnitte unterteilt: Beladeverkehr, eventuell mehrere Beladestellen umfassend, Traktionsstrecke und Entladeverkehr, eventuell mit mehreren Entladestellen. Auf der Traktionsstrecke überbrücken die Traktionsfahrzeuge im Pendelverkehr den Hauptlauf und befördern Trailer von einem Umschlagpunkt zum anderen. Ziel ist es, mit möglichst wenigen Traktionsfahrzeugen möglichst viele Transporte auf der Traktionsstrecke

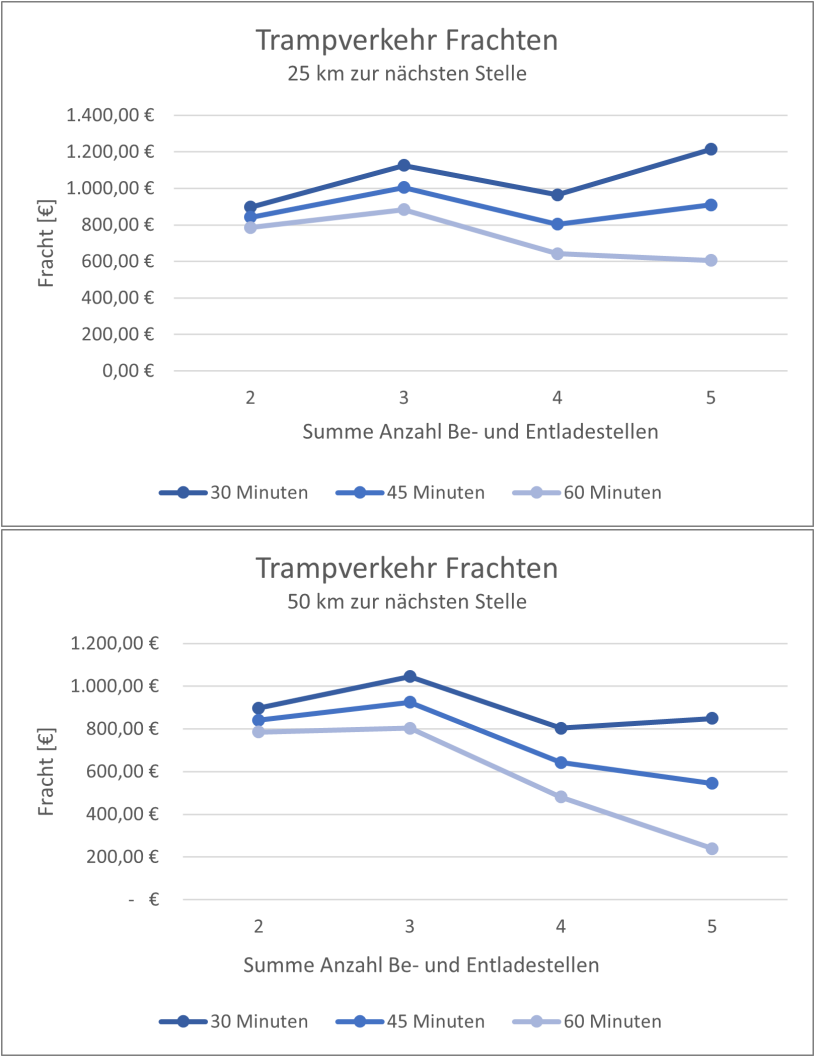


Abbildung 3.5: Frachterlös abhängig von Be- und Entladebedingungen

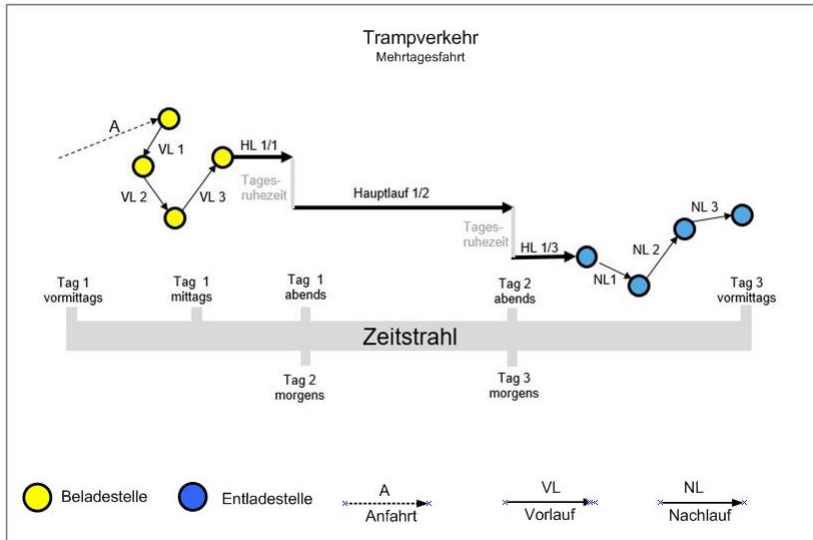


Abbildung 3.6: Zweitagesfahrt

abzuwickeln. Im Falle des eWay ist die Traktionsstrecke mit Oberleitung ausgerüstet und die Traktionsfahrzeuge sind HO-SZM. Die Fahrzeuge für die Be- und Entladefahrten rund um die Umschlagpunkte brauchen keine HO-Ausrüstung.

Voraussetzungen für eine hohe Effizienz:

1. Aus einem Zielgebiet - gleichzeitig auch Quellgebiet - in ein anderes Ziel-Quellgebiet gibt es ein ausreichend hohes und kontinuierliches Ladungsaufkommen. Hierauf weist auch Zanker (2018) hin.
2. Idealerweise kann ein Teil der am Tag A geladenen Ladungen erst am Tag C zugestellt werden.
3. Die HO-Fahrzeuge laufen rund um die Uhr, bei genügend hohem Aufkommen auch an Samstagen und müssen daher mit mehr als einem Fahrer besetzt sein.

4. Die Hauptlaufstrecke zwischen den Ziel-Quellgebieten ist nur so lang, dass ein Fahrer in einer Schicht den Hin- und Rücktransport bewältigen kann. Ein weiterer Fahrer kann dann mit demselben Fahrzeug einen weiteren Umlauf innerhalb eines 24-Stunden-Zeitraums schaffen. Bei längeren Transportentfernungen wird das durch Begegnungsverkehr mit einem weiteren Umschlagpunkt möglich.
5. Eine der beiden vorgeschriebenen Lenkzeitunterbrechungen muss am Umschlagpunkt im Zielgebiet stattfinden.
6. Die Zahl der im Modell eingesetzten Trailer ist größer als die Summe der an den beiden Umschlagpunkten stationierten Nahverkehrs-LKW.
7. Die IT-Systeme der Teilnehmer sind vernetzt, sodass der Aufenthaltsort der Trailer und welches Fahrzeug von welchem Systempartner einen Auflieger gezogen hat, jederzeit nachzuvollziehen ist.

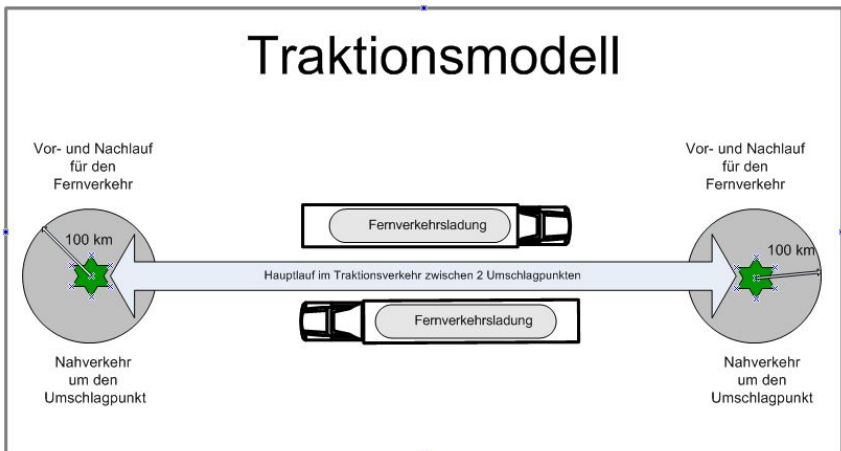


Abbildung 3.7: Traktionsverkehr zwischen 2 Umschlagpunkten (Short Haul)

Ersetzt Traktionsverkehr den Trampverkehr und wickelt er die gleiche Anzahl von Touren ab, dann sollte das unter den beschriebenen optimalen Bedingungen mit weniger Zugmaschinen machbar sein:

- Die SZM im Pendelverkehr bewältigen mit einem Fahrer 2 Touren je Schicht. Zudem können diese LKW 2-schichtig eingesetzt werden.
- Bei den SZM, die im Nahverkehr um die Umschlagpunkte die Vor- und Nachläufe abwickeln, entfällt die Lenkzeit für den Hauptlauf, es kommen aber die Lenkzeit für den Zulauf und Ablauf hinzu. Diese sind vergleichsweise kurz, so dass bei ansonsten gleichen Bedingungen der Zeitbedarf deutlich kleiner ist. Demzufolge könnten diese Fahrzeuge zusätzlich zum Be- und Entladeverkehr weitere Nahverkehrstouren abwickeln, oder man vermindert die Zahl der Fahrzeuge.

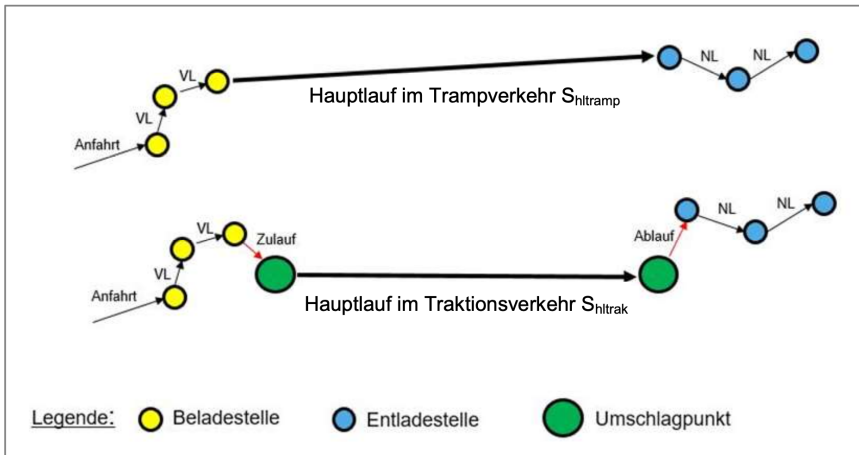


Abbildung 3.8: Traktionsverkehr ersetzt Trampverkehr

Im Kapitel 4 wird die Ermittlung der notwendigen Fahrzeugzahlen und deren relativer Anteil beschrieben.

Folgende Vorteile sprechen für die Einbeziehung von Traktionsverkehren:

1. Die Zahl der SZM auf der Traktionsstrecke ist kleiner als die Zahl der übrigen im System eingesetzten Sattelzugmaschinen. Wenn also, wie im Falle des eWay, für die Traktionsfahrzeuge erhöhte Anschaffungskosten anfallen, dann betrifft das nur wenige Fahrzeuge, wodurch sich die Anschaffungskosten für die Fahrzeuge im System insgesamt reduzieren.
2. Die Fahrerbesetzungen auf den HO-Fahrzeugen starten jeweils am oder in der Nähe ihres Firmensitzes oder Wohnsitzes und kehren dorthin nach Ende Ihrer Schicht wieder zurück. Ihre freie Zeit zwischen den Schichten verbringen sie an Ihrem Wohnort, sie sind demnach Nahverkehrsfahrer mit vergleichsweise niedrigeren Gehältern. Bei der Rekrutierung oder der Bindung von Fahrpersonal ist Nahverkehrseinsatz ein großer Vorteil.
3. Mit den nicht auf der Fernstrecke eingesetzten SZM werden die Vor- und Nachläufe zu den Fernverkehrstransporten abgewickelt und wenn es die Zeit erlaubt, zusätzliche Transporte im Nahverkehr. Während der vorgeschriebenen Schichtunterbrechungen befinden sich die LKW am Firmensitz, so dass während dieser Zeit zusätzliche Nahverkehrsfahrer, weitere Transporte durchführen können.

Große Umschlaggebiete erweitern zwar die Zahl der Transporte, die über Traktionsverkehr abgewickelt werden können, das Verhältnis zwischen Be- und Entladeverkehr einerseits und Hauptlaufstrecke andererseits setzt aber Grenzen bezüglich der Wirtschaftlichkeit. Das verdeutlicht die Abb. 3.7, in der die beiden Quell-Ziel-Gebiete einen Radius von 100 km haben. Bei einer Komplettladung könnten dort Be- und Entladestelle jeweils maximal 100 km vom Umschlagpunkt entfernt liegen. Vor- und Nachlaufstrecke addieren sich dann auf 200 km. Bei mehreren Beladestellen und mehreren Entladestellen können sich Be- und Entladeverkehr zu ähnlich großen Strecken summieren, selbst wenn diese nicht an den äußersten Grenzen des Umschlaggebiets liegen. In Abschnitt 5.2 wird dieser Sachverhalt näher untersucht.

Betreiber von Traktionsverkehren könnten Speditionen mit sehr großem eigenem Fuhrpark sein, die möglicherweise bereits zwischen eigenen Niederlassungen oder mit Niederlassungen von Kooperationspartnern Begegnungsverkehr betreiben. Für den großflächigen Einsatz von Traktionsverkehr wäre eine Lösung ähnlich *Flixbus* vorstellbar und wahrscheinlicher: Statt Buslinien würden Traktionslinien angeboten werden, und wie bei *Flixbus* könnten regional unterschiedliche Unternehmen die Traktionsfahrzeuge stellen. In einer Weiterentwicklung des Systems könnten dauerhaft teilnehmende Unternehmen einen Trailerpool bilden oder der Systemanbieter könnte einen solchen zur Verfügung stellen.

Tabelle 3.4: Anzahl SZM im Güterkraftverkehr

Eingesetzte Fahrzeuge Stand November 2010		
	SZM	
	Anzahl	Anteil
gewerblicher Güterkraftverkehr	159.374	81%
Werkverkehr	37.262	19%

Quelle: Auszug aus BGL (VWZ 2014/2015 Seiten 7 und 19)

Eine Einschätzung, welche und wie viele Transporte überhaupt im Traktionsverkehr abgewickelt werden könnten, erlaubt folgende Überlegungen:

1. Die Tabelle 3.4 gibt für die SZM vor, welche Anzahlen auf gewerblichen Güterkraftverkehr und Werkverkehr entfallen. Überträgt man diese Werte aus dem Jahr 2010 auf die 183.000 SZM im untersuchten System, dann

laufen davon 148.230 im gewerblichen Güterkraftverkehr und 34.770 im Werkverkehr.

2. Göckeler, Hacker et al. (2020, Abb. 2-1, S. 14) stellen für das 4. Quartal 2018 fest, dass nur 13% aller Fahrten deutscher Lastkraftfahrzeuge auf den Bereich über 150 km entfallen, damit aber 67% der gesamten Beförderungsleistung erbracht wird. Auf die Zahlen aus Ziffer 1 übertragen ergibt das 19.270 SZM im gewerblichen Güterkraftverkehr und 4.520 SZM im Werkverkehr.
3. In Wietschel, Gnann et al. (2017, Abb. 3.13, S. 74) ist der Anteil unterschiedlicher Fahrzeugaufbauten dargestellt. Für die Gewichtsklasse SZM werden jeweils rund 15% Baufahrzeuge und Sonstige genannt. Aus diesen Fraktionen könnte eine weitere Zahl für den Einsatz im Traktionsverkehr ausscheiden. Eine genaue Zahl ist aber nicht abzulesen, da es eine Überlappung mit den SZM im Nah- und Regionalverkehr gibt.
4. In Prokop und Stoller (2012, S. 22) wird für das Jahr 2010 die mittlere Transportweite für den LKW-Transport mit 104 km angegeben. Selbst unter der sehr unwahrscheinlichen Annahme, dass diese in den letzten zehn Jahren um 50% gestiegen wäre, so läge sie mit etwa 150 km heute noch immer in einem Bereich, in dem Traktionsverkehr wegen der Zu- und Abläufe keine sinnvolle Alternative ist.

Nimmt man die Zahlen aus Ziffer 2, dann könnten rund 23 Tsd. LKW für den Traktionsverkehr in Frage kommen, was einem Anteil von nur 12,6% entspricht, aber 67% der Beförderungsleistung ausmacht.

3.2.1 Umschlagpunkte

Bei den HO-Strecken für Traktionsverkehre wird es sich ausschließlich um Autobahnabschnitte handeln. Daher gilt für alle Traktionsmodelle, dass es in der Nähe von Autobahnanschlüssen Umschlagpunkte geben muss, an denen die Trailer

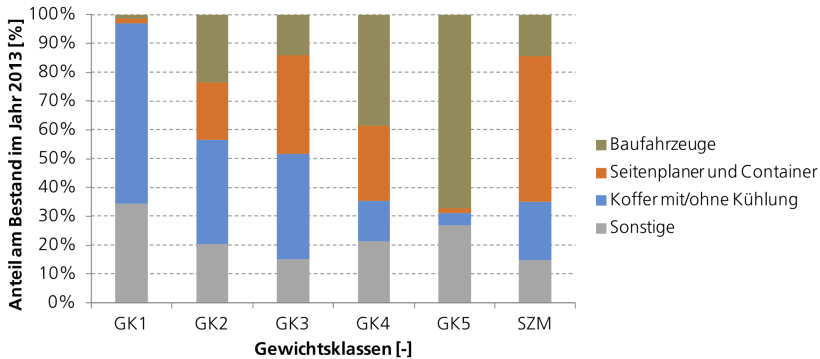


Abbildung 3.9: Gewichtsklassen und Aufbauten

abgestellt und wieder übernommen werden können. Im Idealfall könnten Speditionen dies aus eigenen Ressourcen oder im Verbund mit Partnern darstellen, wenn ihre Betriebshöfe in der Nähe der Autobahn liegen. In Frage kommen theoretisch auch Autobahnraststätten oder Autohöfe entlang der Autobahnen, wobei diese auch ohne solche zusätzlichen Verkehre, zumindest ab den frühen Nachmittagsstunden und während der Nacht, schon überfüllt sind. Es ist daher anzunehmen, dass Autobahnraststätten grundsätzlich nicht in Frage kommen, da dort immer die Gefahr besteht, dass abgestellte Trailer durch andere Lastzüge zugeparkt werden können und damit der gesamte eng durchgetaktete Ablaufplan gestört wird. Im Falle der Autohöfe könnte allerdings die Möglichkeit bestehen, sich dort einen ganzen Bereich oder zumindest feste Plätze anzumieten. Über deren Größe und deren Kosten erfolgen Angaben im Abschnitt 6.2. Die Verfügbarkeit von geeigneten Umschlagplätzen ist jedenfalls Voraussetzung für die Durchführung von Traktionsverkehren und dafür gelten folgende Forderungen:

- Die Entfernung zur HO-Strecke sollte gering sein, idealerweise unter 15 km, da diese Teilstrecke pro Tour zweimal anfällt und somit schon knapp 10% einer optimalen Traktionsstrecke hat. Wegen der geringeren Durchschnittsgeschwindigkeit wird der Zeitanteil noch darüber liegen.

- Der Betrieb auf dem Umschlagplatz sollte Tag und Nacht möglich sein. Dafür kämen Autobahn oder Industriegebiet in Frage.
- Es sollten ausreichend große Stellflächen zur Verfügung stehen, ohne die Notwendigkeit zeitraubenden Rangierens.

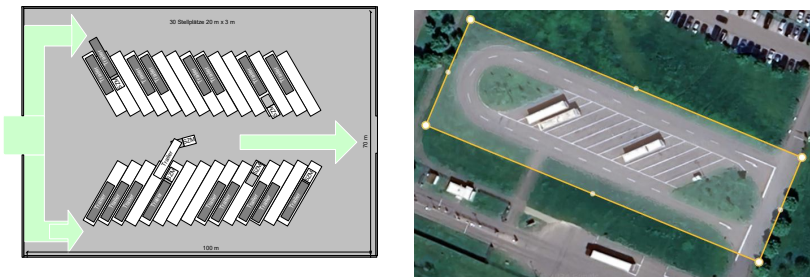


Abbildung 3.10: Trailerstellplätze am Umschlagpunkt

Abb. 3.10 zeigt rechts ein Luftbild (Google Earth) eines LKW-Parkplatzes vor einem Automobilwerk, auf dem auf einer Fläche von 4.787 qm 13 Stellplätze angeordnet sind. Das entspricht einem Platzbedarf von 368 qm pro Stellplatz. Auf der linken Darstellung wird gezeigt, dass mit wachsender Zahl der Stellplätze und bei geänderter Verkehrsführung auch deutlich niedrigere Werte erreicht werden können. Bei diesem alternativen Layout sind auf 7.000 qm Fläche 30 Stellplätze vorhanden, und der Platzbedarf pro Stellplatz sinkt um rund 40% auf 233 qm.

3.2.2 Short Haul

Die immer selben HO-Sattelzugmaschinen verkehren zwischen den zwei selben Quell- und Zielgebieten und bewegen vorgeladene Trailer von einem Umschlagplatz im Quellgebiet zu dem anderen Umschlagpunkt im Zielgebiet, welches dann für den Rücktransport zum Quellgebiet wird, siehe Abb. 3.7.

In den beiden Quell-Zielgebieten fahren Fahrzeuge entweder derselben Firma oder Fahrzeuge von zwei Kooperationspartnern. Den Transport auf der Fernstrecke machen Fahrzeuge, entweder dieser beiden Firmen, oder von einer oder mehreren weiteren Firmen, im Folgenden als Trakteure bezeichnet.

Die beiden Zielgebiete liegen entlang einer Hauptverkehrsverbindung möglichst weit, aber nur so weit auseinander, dass ein Fahrer Hin- und Rückfahrt, also einen Umlauf, in einer Schichtzeit bewältigen kann. Unter Berücksichtigung normaler Fahrtbedingungen auf Autobahnen und der Zeiten für das Wechseln der Trailer an den Umschlagpunkten ergibt sich daraus eine Strecke von maximal 350 km.

3.2.3 Long Haul

Die Abb. 3.11 stellt den Ablauf einer Traktionsfahrt über längere Distanzen dar, hier mit einem zusätzlichen Umschlagpunkt in der Mitte der Transportstrecke. Mit weiteren Umschlagpunkten ließe sich das System mit aufeinanderfolgenden Begegnungsverkehren beliebig verlängern. Auch hier gilt, dass Trakteure mit ihren

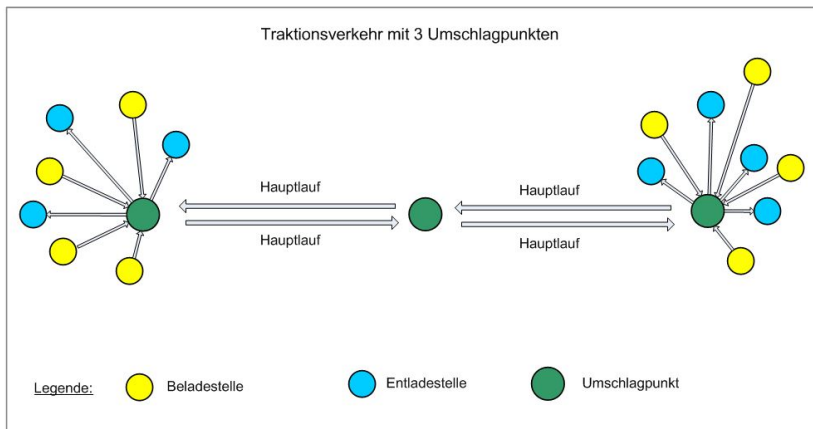


Abbildung 3.11: Traktionsverkehr mit 3 Umschlagpunkten

HO-Sattelzugmaschinen ausschließlich HO-Strecken befahren und Trailer von beliebigen Firmen von unterschiedlichen Umschlagpunkten zu unterschiedlichen Umschlagpunkten ziehen.

Die Auftraggeber und Trakteure kommunizieren über eine Internetplattform, die ein Betreiber, ähnlich *Uber* oder *airbnb*, per App zur Verfügung stellt und über welche Buchung und Abrechnung laufen.

Vorteile:

1. Die Auftraggeber brauchen keine HO-Fahrzeuge.
2. Die Auftraggeber brauchen trotz großer Transportentfernungen kein Fahrpersonal für Fernverkehrseinsatz.
3. Die HO-Fahrzeuge der Trakteure fahren fast ausschließlich unter der Oberleitung und können so durch die geringeren Betriebskosten eventuelle Mehrkosten bei der Fahrzeugbeschaffung schneller kompensieren.
4. Die Trakteure brauchen ausschließlich ihre HO-Sattelzugmaschine. Sie müssen keine Trailer anschaffen, keine Akquise und auch keine Fahrzeugdisposition oder Leergutverwaltung betreiben. Die Arbeit als Trakteur eignet sich damit für Berufseinsteiger als selbstfahrende Unternehmer.

Hemmnisse:

1. Das Modell eignet sich nur für HO-Strecken mit hohem Transportaufkommen. Andere Strecken würde man allerdings auch nicht elektrifizieren.
2. Auch bei diesem Modell braucht es die Umschlagpunkte entlang der HO-Strecke.
3. Es braucht einen Investor, der die App entwickelt und in den Markt bringt.
4. Für die Trakteure besteht die Gefahr, ähnlich der Situation bei *uber*, dass viele Trakteure sich gegenseitig unterbieten und ihre wirtschaftliche Situation schwächen. Kommt es dadurch zu Insolvenzen, so kann das zu Instabilität des Systems führen.

Stafettenverkehre werden von Clausen (2015, S. 9) als eine Möglichkeit für die Abwicklung überregionaler Transporte angeführt. HO-SZM könnten die oben beschriebenen eWay-Verbindungen und deren Infrastruktur ebenfalls nutzen, allerdings ohne Übergabe von Trailern von einer Zugmaschine zu einer anderen. Sie könnten in den Quell-Zielgebieten jeweils Teilentladungen und Teilbeladungen durchführen und bei Bedarf die dortigen Ladestationen nutzen, bevor sie sich auf eine neue Hauptlaufstrecke begeben. Nach Hacker, Blanck et al. (2020, S 68) geht es bei Stafettenverkehren weniger um die Verbesserung der zeitlichen Auslastung der Fahrzeuge, als um die Reduzierung der Zahl der eingesetzten Fahrzeuge.

3.2.3.1 Long and fast

Durch die Internationalisierung von Lieferketten, insbesondere der Automobilindustrie, gibt es eine Vielzahl von Transporten mit Transportentfernungen von mehr als 1.000 km. Solche Transporte sind innerhalb einer Schichtzeit durch einen Fahrer nicht zu bewältigen. Da bei Doppelbesatzung der LKW die Schichtzeit auch für den zweiten Fahrer zeitgleich mit der des ersten Fahrers beginnt, stellt die Doppelbesatzung in diesem Zusammenhang keinen Vorteil dar. Der in den Abb. 3.12 und 3.13 dargestellte Transport von einem Konsolidierungslager in der Nähe von Baden-Baden an das Mercedes-Werk in Kecskemet (Ungarn) ist eines von vielen Beispielen für Transporte, die regelmäßig laufen. Die Speditionsoftware ermittelt für diesen Transport eine Fahrtzeit von annähernd 14 Stunden. Es wird also bei einer Einmannbesatzung eine Tagesruhezeit von regelmäßig 11 Stunden in Österreich hinzukommen. Nimmt man die vorgeschriebenen Lenkzeitunterbrechungen hinzu, dann wird der LKW, selbst unter störungsfreien optimalen Bedingungen, frühestens nach ungefähr 24 Stunden am Ziel eintreffen.

Der in Abb. 3.14 dargestellte Transport von Bochum zu Ford in Valencia wäre mit nur einer Tagesruhezeit nicht mehr zu schaffen. Das gilt in umgekehrter Fahrtrichtung für die Obst- und Gemüsetransporte ab Almeria in Südspanien an Empfänger in Deutschland oder gar in den Niederlanden umso mehr. Im Falle der Transporte für die Automobilindustrie sind diese Transportzeiten für die Regeltransporte innerhalb der Lieferketten berücksichtigt. Bei den Obsttransporten setzen die



Abbildung 3.12: Transport Deutschland – Ungarn

Abfahrtzeit		jetzt	
1	ALL ▼ 76549 Hügelsheim, Deu...	📍	+ x
Am Stopp: 16:15 → 16:15			
1.058,5 km 13 h 51 m		Maut:	⚠️
2	ALL ▼ 6000 Kecskemet, Ungarn	📍	+ x
⚠️ Am Stopp: 06:06 → 08:00			

Abbildung 3.13: Protokoll zu Transport Deutschland – Ungarn

Transportunternehmen Trailer mit Kühlung ein. Alleine die Firma *Primafrio* aus Murcia fährt nach eigenen Angaben mit mehr als 2.700 solcher Kühlzüge. Die Landwirte ernten entsprechend früh, so dass die zwei bis drei Tage Transport noch Reifezeit sind, wie in Dörken (2013, S 4) am Beispiel von Litschis angesprochen wird. Sofern Fahrer bereitstehen, die, betrachtet man die Hin- und die Rückfahrt, für bis zu einer kompletten Woche ihre Nächte in ihren LKW verbringen, und sind die Güter nicht zeitsensibel, so besteht kein Bedarf, die beschriebenen Abläufe zu ändern. Traktionsverkehr könnte allerdings in beider Hinsicht Vorteile bringen.

Wenn die europäischen Hauptrouten als eWay ausgebildet wären, würden sich zudem deutliche CO₂-Reduzierungen erreichen lassen.

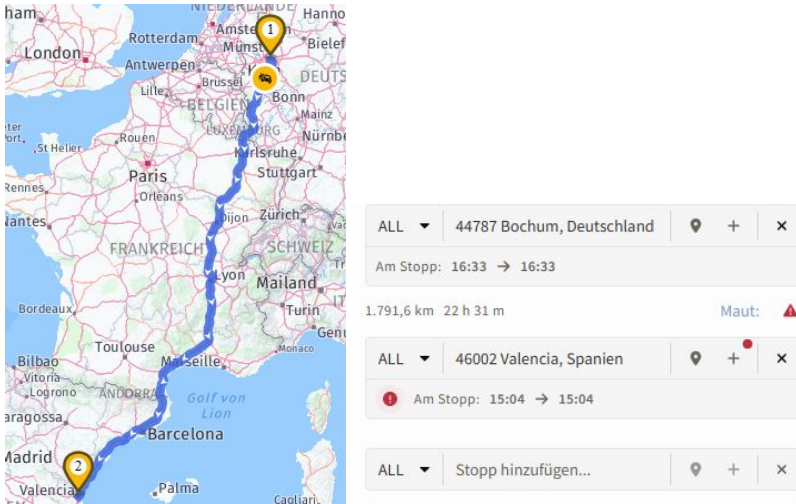


Abbildung 3.14: Transport Bochum – Valencia (Quelle: IMPARGO GmbH)

3.3 Linienverkehr

Während man im Trampverkehr überwiegend Komplettladungen und nur in geringerem Umfang auch Teilladungen befördert, dreht es sich bei innerdeutschem Linienverkehr um den Transport von Teilpartien oder Stückgütern als Sammelladung. Dabei werden nach einem Fahrplan bestimmte Zielorte oder zumindest Zielgebiete angefahren. Laut A. Marx (1967) steht allerdings nicht fest, ob man generell von einem fahrplanmäßigen Rhythmus ausgehen kann. Die Taktung kann also sehr unterschiedlich sein und hängt davon ab, mit welchem Sendungsaufkommen für eine Zielrelation zu rechnen ist. Auftraggeber mit einem kontinuierlichen Aufkommen an Teilpartien und Stückgütern erwarten heute von ihren Transporteuren den täglichen Versand in jedes Zielgebiet im Inland, teilweise auch im

europäischen Ausland. In der Praxis kann das bedeuten, dass ein Versender für unterschiedliche Länder oder dort sogar für unterschiedliche Gebiete verschiedene Frachtführer einsetzt, je nach deren Stärke auf gewissen Relationen. Dabei handelt es sich in aller Regel um Speditionsunternehmen, welche mit eigenem Fuhrpark den Transport durchführen, man spricht dann vom Selbsteintritt, oder diesen von Subunternehmern durchführen lässt.

Ein typischer Transportablauf kann wie folgt aussehen:

Nahverkehrsfahrzeuge sammeln rund um den Speditionssitz Stückgüter und Teilpartien ein und bringen diese an das Speditionslager (Depot). Ein eigenes Fernverkehrsfahrzeug oder das eines Transportunternehmens wird für die Durchführung der Sammelladung zu einem festen Preis gebucht und lädt bereits eine größere Teilpartie an (Vorlauf), bevor der Lastzug am Lager (Abgangsdepot) mit weiteren Teilpartien aufgefüllt wird. Die Fahrt führt dann an das Empfangsdepot, meist eine eigene Niederlassung des Spediteurs, oder zum Depot eines Partnerunternehmens. Dort erfolgt die Entladung, entweder des ganzen Lastzuges, oder nur des Großteils und der Frachtführer stellt die von ihm vorgeladene größere Teilpartie selbst zu (Nachlauf).

Obwohl es sich bei diesem Transportbeispiel um einen Linienverkehr handelt, könnte es für den Frachtführer ein Transport im Trampverkehr sein, wenn er sich nach beendeter Entladung einen neuen Auftrag beim selben oder bei einem anderen Auftraggeber sucht.

Tatsächlich laufen die allermeisten dieser Verkehre heute zwischen den eigenen Filialen der großen Speditionen. Soweit das eigene Netz nicht jedes Gebiet abdeckt, wird das über Partnerspediteure dargestellt. Meist sind Versandspedition und Empfangsspedition Mitglieder des selben Speditionsnetzwerks.

Je nach Dichte des Netzes kann ein solcher Linienverkehr auch zwei Empfangsdepots ansteuern. Die Entfernung zwischen Abgangsdepot und erstem Empfangsdepot darf dann aber nicht sehr groß sein, da die Entladung an beiden Empfangsstationen so rechtzeitig erfolgen muss, dass die Güter noch in den täglichen Sammelgutausgang eingespeist werden können.

3.4 Systemverkehr

Systemverkehre laufen zwischen den eigenen Niederlassungen großer Sammelgutspeditionen oder zwischen den Partnern eines Speditionsnetzwerkes. Wie Dabidian und Stone (2012) in den Abbildungen 3.15 schematisch darstellen, können solche Verkehre direkt von einer Niederlassung zur anderen Niederlassung laufen (Direktverkehr) oder über ein Hub (Hub-Verkehr). Dabei müssen nicht alle Niederlassungen zwangsläufig mit jeder anderen verbunden sein, und sie können auch nur als Versand- oder Empfangsdepot dienen.

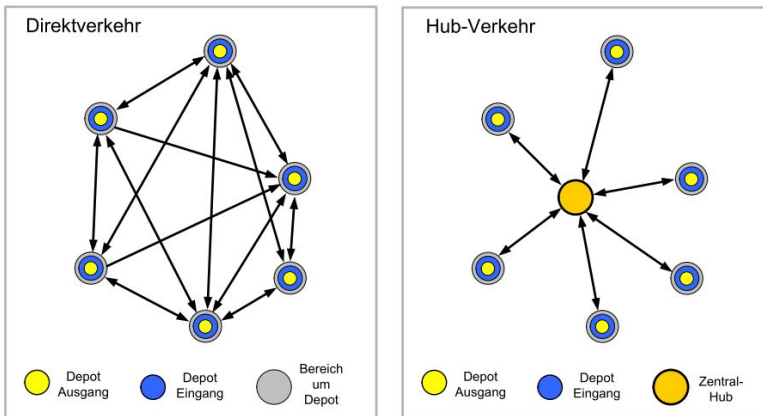


Abbildung 3.15: Systemverkehre

Hub-Verkehre laufen von der Niederlassung zu einem Hub, das verkehrsgünstig in der geografischen Mitte der Einsatzgebiete liegt (Zentralhub). Dort treffen sich, normalerweise während der Nacht, die Lastzüge aus allen Richtungen. Diese werden entladen und übernehmen nach Konsolidierung im Hub wieder Ladung für das Ausgangsdepot. Die Entladung erfolgt meist an Rampen und von hinten. Eine Ausnahme bildet der Umschlag bei der *E.L.V.I.S. AG* (ELVIS) in Knüllwald, wo von der Seite umgeladen wird. Die Hub-Verkehre unterliegen sehr engen Zeitplänen: Die Lastzüge aus den am weitesten entfernten Depots müssen

nach erfolgtem nächtlichen Umschlag das Hub wieder als Erste verlassen können. Stückgutkooperationen mit ausreichend großem Sendungsaufkommen haben nach den erfolgreichen Erfahrungen mit ihren Zentral-Hubs zusätzlich auch Regional-Hubs errichtet. Die Hub-Verkehre können Sendungen für viele unterschiedliche Zielgebiete zusammenfassen, erlauben dem Spediteur also bei kleinerem oder nicht kontinuierlich anfallendem Sendungsaufkommen eine höhere Flexibilität. Während über die Hub-Verkehre zunächst ausschließlich Paketsendungen, Stückgüter, in Ausnahmefällen auch sehr kleine Teilpartien versendet wurden, kam mit dem Teilladungsnetzwerk ELVIS die Möglichkeit, unter genau den Regeln dieser Systemverkehre nun auch Teilladungen zu versenden.

Die **Direktverkehre** auf bestimmten Relationen setzen voraus, dass eine Spedition für die tägliche Abfahrt genug Sendungen in genau dieses Zielgebiet hat. Ist das dauerhaft gegeben, dann bietet der Direktverkehr Kostenvorteile, vermeidet Schäden beim zusätzlichen Umschlag am Hub und kann schneller sein. Da diese Systemverkehre regelmäßig und über mittlere Transportdistanzen von ungefähr 300 km laufen, wie in Abschnitt 3.4.1 dargestellt, könnten solche Systemverkehre den eWay nutzen.

Unabhängig davon, ob Systemverkehre direkt oder über ein Hub laufen, bieten sie folgende Vorteile:

- Fahrpersonal kann im Schichtdienst eingesetzt werden.
- Fahrpersonal kehrt, zumindest in Hub-Verkehren, nach Fahrtende an den Standort zurück.
- Fahrzeuge können mehrschichtig eingesetzt werden.
- LKW kann bei Bedarf auf eigene oder auf Tankstellen und Servicestationen der Partner zugreifen.

3.4.1 Hub-Verkehr der großen Logistiknetzwerke in Deutschland

Befragungen unter den Fuhrparkbetreibern haben ergeben, dass mit Blick auf das Jahr 2030 dem System eWay die geringste Marktverfügung zugesprochen und es allenfalls in Nischen erwartet wird, wie Göckeler, Haase et al. (2022, S 34) feststellen. Mit den in diesem Abschnitt beschriebenen Verkehren untersucht diese Arbeit eine solche Nische und beantwortet die Frage, ob diese Nischenanwendung einen Einstieg in einen flächendeckenden Einsatz darstellen könnte. Zumal Göckeler, Hacker et al. (2020, S 22) dem Hub-Verkehr unter anderem einen hohen Standardisierungsgrad zuschreiben und man dort große Chancen für eine schnelle Durchdringung des Marktes für E-LKW sieht.

3.4.1.1 Ausgangslage

In der Mitte Deutschlands liegen, in einem Umkreis von 50 km um Bad Hersfeld, wie in Abb. 3.16 schematisch dargestellt, zahlreiche Zentral-Hubs der deutschen Stückgut- und Teilladungsnetzwerke, sowie mehrere Hubs der Paketdienstleister und großen Versandhändler. Zu diesen Hubs kommen an Werktagen jede Nacht die Lastzüge aus den Depots in ganz Deutschland und aus einigen Nachbarländern. Diese werden dort entladen und fahren mit Ladung für die Depots wieder zurück. In der Regel handelt es sich dabei um die immer selben Sattel- oder Hängerzüge mit einer Kapazität von 13,6 oder 14 Lademetern und einem zGG von 40 Tonnen. Man hat damit eine zumindest hinreichend quantifizierbare Menge von LKW, die sich aufgrund ihrer Größe und ihres Einsatzgebietes für das System eWay eignen würden.

Für diese Verkehre gelten die oben gemachten Aussagen zu Systemverkehr allgemein und zu Hub-Verkehr im Besonderen. Für die Auffassung, dass diese Verkehre einen Einstieg in das System eWay darstellen könnten, sprechen folgende Gründe:

- der eWay wird später Bestandteil eines größeren Elektronetzes
- ganzjährig laufende paarige Verbindungen
- Einsatz von überwiegend denselben Fahrzeugen
- Fahrzeuge gehören meist zu größeren Flotten
- Transporteure sind meist größere Firmen

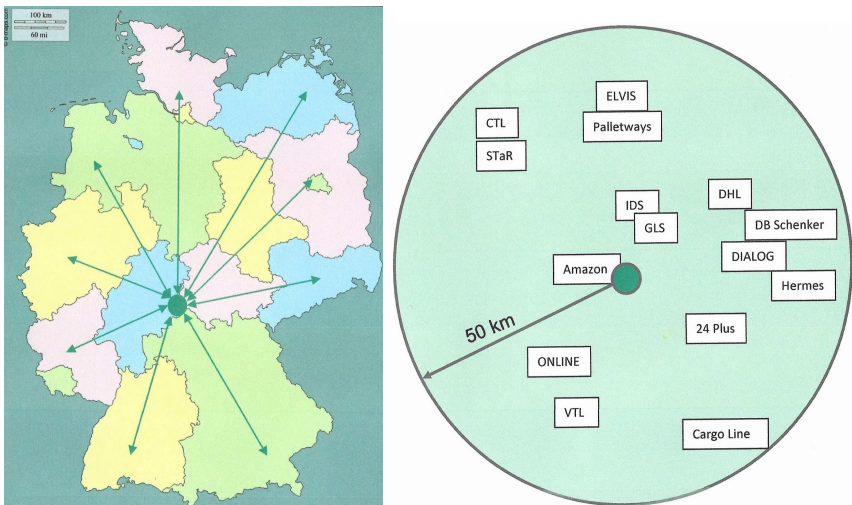


Abbildung 3.16: Zentral-Hubs in der Mitte Deutschlands

Im Vergleich zu den derzeitigen Teststrecken würde zwar ungefähr die 10-fache Streckenlänge als eWay ausgerüstet werden müssen, aber es stünde ein mehr als 100-faches Potential an Echtdaten zur Auswertung zur Verfügung. Diese sollten außerdem weit aussagekräftiger sein, da die HO-SZM nicht nur in sehr kurzen Abschnitten im HO-Betrieb laufen und außerdem auch Gefäll- und Steigungsstrecken befahren würden.

3.4.1.2 Hub-Netze

Es wurden zwei unterschiedlich lange Strecken definiert, die nach erfolgter Elektrifizierung von möglichst vielen der Hub-Fahrzeuge befahren werden. So kann im Vergleich zum heutigen Dieselsbetrieb ermittelt werden, welche CO₂-Ersparnis erzielt werden kann, wenn diese Fahrzeuge in einem Einstiegsszenario als Dieselhybride unter Oberleitungen (HO-Fahrzeuge) fahren, mit welchen Kosten diese CO₂-Einsparung erkaufte werden würde und welchen Einfluss die Streckenlänge auf CO₂-Ersparnis und Kosten hat.

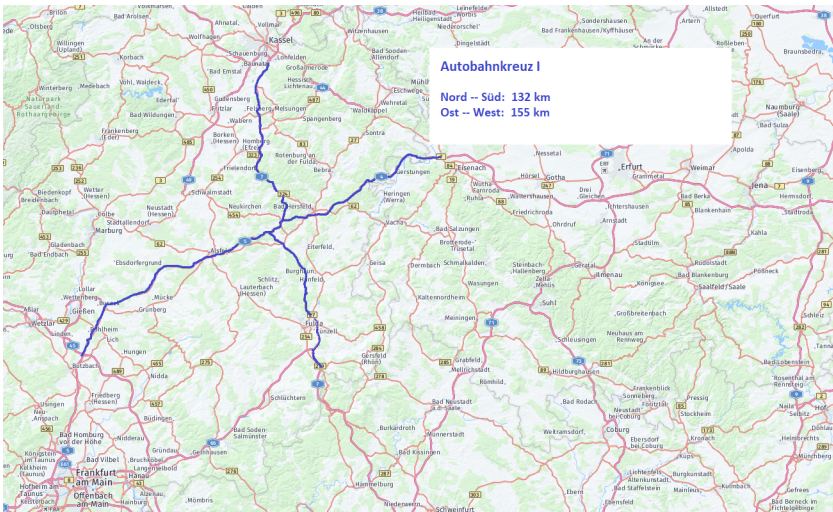


Abbildung 3.17: Hub-Netz klein

Die in Abb. 3.17 gezeigten HO-Strecken mit einer Länge von 260 km führen von Eisenach im Osten an das Autobahnkreuz Gambach im Westen und von Lohfelden bei Kassel im Norden nach Bad Brückenau im Süden.

Der Einfluss der Länge der elektrifizierten Strecke auf Kosten und CO₂-Ersparnis wurde anhand eines vergrößerten Hub-Netzes überprüft. Das in Abb. 3.18 dargestellte HO-Netz wurde im Osten bis zum Autobahnkreuz Hermsdorf und im

Süden bis zum Dreieck Werneck verlängert und hat nun eine Länge von 432 Kilometern.

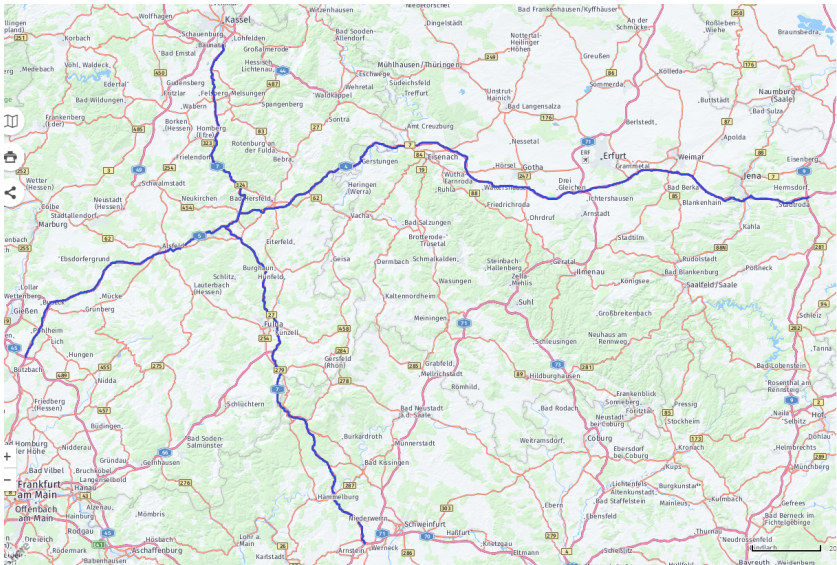


Abbildung 3.18: Hub-Netz groß

Beide Netze würden, falls das System eWay zu einem späteren Zeitpunkt realisiert würde, Teile des ungefähr 4.000 km langen Kernnetzes bilden.

3.4.1.3 Auswertungen

Von 7 Netzwerken wurden Depotlisten und Anzahl der täglichen Fahrten zum Hub erfragt. Aus diesen Angaben ließen sich die Anzahl der täglichen Fahrten und die zurückgelegten Strecken ermitteln. Die Ermittlung des auf Elektrostrecken entfallenden Anteils wurde analog des im Abschnitt 2.5 beschriebenen Verfahrens vorgenommen. Die Berechnungen und Ergebnisse werden im Anschluss an andere Parameterstudien im Abschnitt 5.5 dargestellt.

3.4.2 Begegnungsverkehr

Vor allem im Hinblick auf möglichst durchgängigen Einsatz ihrer Fahrzeuge und auf planbare, attraktive Einsatzbedingungen für das Fahrpersonal nutzen Spediteure für Ferntransporte den Begegnungsverkehr. Dieser läuft entweder zwischen eigenen Niederlassungen oder im Verbund mit einem Geschäftspartner, oft sind das Angehörige desselben Speditionsnetzwerkes. Ziel ist es, die Fahrer am Ende der Schichtzeit wieder am Ausgangsort zu haben. Üblicherweise laufen die Begegnungsverkehre während der Nacht und je nach Relation zu bestimmten festgelegten Zeiten. Abhängig vom Sendungsaufkommen jede Nacht, oder bei Bedarf nach Absprache. Die Partner legen dazu einen Treffpunkt fest, meist sind das Autohöfe oder Industriegebiete in der Nähe von Autobahnausfahrten, an dem die Tauschpartner ihre Wechselbrücken oder Sattelaufzieger tauschen. Unter Berücksichtigung ihrer 45-minütigen Lenkzeitunterbrechung verlassen beide Lastzüge den Treffpunkt wieder mit Ladung für den eigenen Betriebshof oder das dortige Empfangsgebiet. Der Treffpunkt muss demnach in längstens 4,5 Stunden Lenkzeit erreichbar sein, damit der Fahrer nach 9 Stunden Lenkzeit wieder am Ausgangsplatz ist. Die mögliche zweimalige Ausdehnung der täglichen Lenkzeit auf 10 Stunden dient dabei als Puffer für nicht planmäßige Abläufe. Nach Rückkehr ans Depot können die SZM mit einer anderen Fahrerbesatzung für eine weitere Schichtzeit genutzt werden, bevor sich daran z.B. ein nächster Begegnungsverkehr anschließen kann. Bei Batterieantrieb ist der 2-Schichtbetrieb nur dann möglich, wenn sehr kurze Batterieladezeiten möglich sind.

In Abb. 3.19 ist ein Begegnungsverkehr mit Sattelzügen schematisch dargestellt. Tatsächlich ist der Tauschvorgang von Trailern einfacher und mit weniger Platzbedarf verbunden als das Tauschen von Wechselbrücken. Nur routinierte Fahrer von Wechselbrückenzügen schaffen es, hintereinander abgestellte Wechselbrücken mit angekuppeltem Anhänger aufzunehmen. Insbesondere während der Nachtstunden besteht dabei auf schlecht beleuchteten Plätzen die Gefahr, den Unterfahrschutz der Anhänger oder die Stützfüße anzufahren, bis hin zum Umkippen der abgestellten Wechselbrücke.

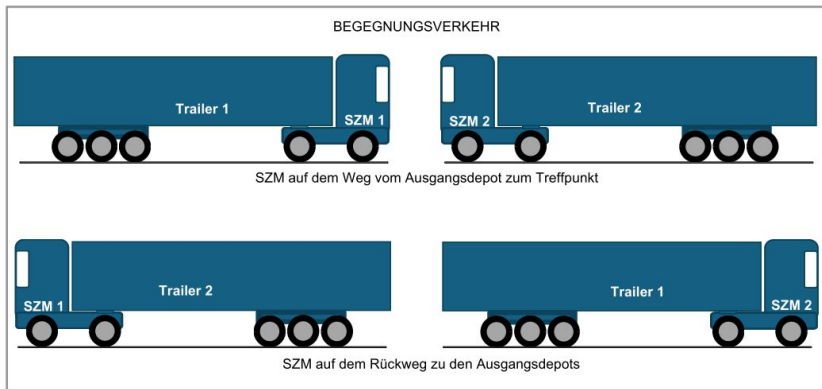


Abbildung 3.19: Begegnungsverkehr mit Sattelzügen

Kunze et al. (2012) berichten von einer Forschungsarbeit, in der untersucht wird, wie Begegnungsverkehre mit Hilfe von Dispositions- und Telematiksystemen für einen größeren und flexiblen Kreis von Teilnehmern organisiert werden können. Ziel ist es, bei Bedarf für unterschiedliche Routen einen passenden Tauschpartner zu finden. Solche Tauschvorgänge wären mit weit größeren Herausforderungen verbunden als die oben beschriebenen Tauschvorgänge zwischen festen Tauschpartnern. So geht man zum Beispiel davon aus, dass Teilnehmer nicht eigene Trailer, sondern Trailer eines gemeinsamen Trailerpools verwenden müssen, und am Ende der Untersuchung wird weiterer erheblicher Forschungsbedarf festgestellt.

3.4.3 Kombi Verkehr

Bei kombiniertem Verkehr sind mindestens zwei der nachfolgenden Verkehrsträger an der Transportdurchführung beteiligt:

- Flugzeug,
- Schiff,

- LKW,
- Eisenbahn.

Zu den wichtigsten Kombinationen zählt die Paarung LKW-Bahn-LKW. Komplexere Kombinationen beziehen den Wassertransport mit ein, und ein internationaler Transport könnte dann wie folgt aussehen: LKW-Binnenschiff-Seeschiff-Bahn-LKW. In Lohre et al. (2015) werden die Qualitätsmerkmale einer Verkehrsleistung aufgeführt:

- Massenleistungsfähigkeit
- Schnelligkeit
- Fähigkeit zur Netzbildung
- Berechenbarkeit
- Häufigkeit der Verkehrsbedienung
- Sicherheit
- Bequemlichkeit

Es wird festgestellt, dass dem Straßengüterverkehr zwar die Massenleistungsfähigkeit des Bahnverkehrs fehlt, er aber wie kein anderer Verkehrsträger in der Lage sei, engmaschige Netze zu knüpfen. Mit dem Kombinierten Verkehr (Kombiverkehr) zwischen Schiene und Straße sollen die Vorteile beider Verkehrsträger verbunden werden. Dazu wurde 1969 in Frankfurt eine Kommanditgesellschaft gegründet, an der neben der DB Cargo 122 Spediteure beteiligt waren. Heute firmiert diese Gesellschaft unter dem Namen Kombiverkehr Deutsche Gesellschaft für kombinierten Güterverkehr mbH & Co. Kommanditgesellschaft. Sie tritt mit dem in Abb. 3.20 gezeigten Logo auf, und tatsächlich verbindet man mit dem Namen Kombiverkehr meistens ausschließlich den Transport von LKW, Lastzügen oder deren Anhänger/Trailer und Wechselbrücken auf der Schiene.



Abbildung 3.20: Logo der Kombiverkehr Deutsche Gesellschaft für kombinierten Güterverkehr GmbH & Co

Laut Satzung der Gesellschaft Kombiverkehr Deutsche Gesellschaft für kombinierten Güterverkehr mbH & Co. Kommanditgesellschaft. (2024) sind die Stimmenverhältnisse der Kommanditisten so ausgestaltet, dass die Gesamtheit der Spediteure/Transporteure einerseits und die DB Cargo andererseits stets dieselbe Stimmenanzahl besitzen. Mittlerweile ist die Zahl der Spediteure auf 223 nationale und internationale Firmen angewachsen und diese können europaweit auf täglich mehr als 170 Zugabfahrten zugreifen. Der Umschlag erfolgt an den Kombibahnhöfen mit unterschiedlichen Kransystemen, und in der überwiegenden Mehrzahl werden Wechselbrücken und Trailer transportiert. Unter dem Namen *Rollende Landstraße* werden aber auch komplette Lastzüge befördert, überwiegend im Alpentransit durch die Schweiz nach Italien, wie auf Abb. 3.21 dargestellt. Auf innerdeutschen Relationen werden unter dem Produktnamen *de.NETeco+* auch CO₂-freie Transporte angeboten. Da für die Zu- und Abläufe in naher Zukunft batteriegetriebene LKW zur Verfügung stehen werden, könnte dann die komplette Strecke CO₂-frei mit Grünem Strom gefahren werden. Da LKW im kombinierten Verkehr bei An- und Abfahrt bis 100 km vom Kombibahnhof von der Begrenzung auf 40 t zGG befreit sind und bis 44 t wiegen dürfen, käme der drohende Nutzlastverlust wegen der schweren Batterien hier nicht zum Tragen.

Tatsächlich begrenzen folgende Gründe die Einsatzmöglichkeiten des Kombiverkehrs für die meisten Transporteure, vor allem im Trampverkehr:

- Zu- und Ablaufstrecke sind im Verhältnis zur Hauptlaufstrecke zu lang.
- Wegen des hohen Verkehrsaufkommens in den frühen Abendstunden und am Morgen, wenn üblicherweise die Zu- und Abläufe stattfinden, nehmen

diese im Verbund mit den Wartezeiten am Bahnhof bei Hauptlaufstrecken bis ca. 500 km annähernd 50% des regulären Trampverkehrs ein.

- Viele Ladungen können erst im Laufe des Nachmittags oder noch später aufgenommen werden, wodurch sich die Abfahrtszeiten am nächsten Kombibahnhof nicht einhalten lassen.
- Anlieferzeiten in den frühen Morgenstunden lassen sich aufgrund der Ankunftszeiten und der Wartezeiten am Kombibahnhof nicht einhalten.
- Die meisten der im Trampverkehr eingesetzten Fahrzeuge sind nicht kranbar.
- Es fehlt ein Partner, der am Bestimmungsbahnhof die Ladung übernimmt.




Abbildung 3.21: Wechselbrücken und Sattelzüge im Kombiverkehr
(Quelle: Hellertal Startbilder.de)

Am Beispiel eines Transports von Rastatt nach Celle für den 29.04.2024 wird das deutlich. Für den direkten LKW-Transport würden folgende Strecken und Fahrtzeiten anfallen:


Entfernung Rastatt–Celle: 539,5 km

Fahrtzeit: Rastatt–Celle: 7 h

Der Fahrplan der Kombiverkehr gibt laut online-Auskunft 2 mögliche Verbindungen an, wie in Abb. 3.22 gezeigt.

Verbindung 1 

Verbindung	Datum	km / Zeit	Laufzeit	Dauer	Verkehrstage	Gateway	Profile	CO _{2e} -Einsparung
Ludwigshafen (Rh) BASF Ubf Hannover Lehrte MegaHub	Mo, 29.04.24 Di, 30.04.24	17.50 03.55	A B	10.05	1 2 3 4 - - -	0	P70 C70 P400 C400	0.642 t (82%)

Verbindung 2 

Verbindung	Datum	km / Zeit	Laufzeit	Dauer	Verkehrstage	Gateway	Profile	CO _{2e} -Einsparung
Ludwigshafen (Rh) BASF Ubf Hannover Lehrte MegaHub	Mo, 29.04.24 Di, 30.04.24	18.50 20:10	A B	1 Tag 1 Std.	1 - - - - -	1	P70 C70 P400 C400	0.514 t (65%)

Abbildung 3.22: Kombiverkehr Verbindung Ludwigshafen–Hannover

Für den LKW-Transport würden im Kombiverkehr zumindest zwei Teilstrecken anfallen:

Entfernung Rastatt–Ludwigshafen: 100 km

Fahrtzeit: Rastatt–Ludwigshafen: 1,5 h

Entfernung Hannover–Celle: 44 km

Fahrtzeit: Hannover–Celle: 0,8 h

Für den Fall, dass die beteiligten Transporteure ihre Fahrzeuge an die Firmensitze nach Karlsruhe und Hannover zurückholen würden, fallen weitere Teilstrecken an:

Entfernung Ludwigshafen– Karlsruhe: 71 km

Fahrtzeit: Ludwigshafen– Karlsruhe: 1 h

Entfernung Celle–Hannover: 44 km

Fahrtzeit: Celle–Hannover: 0,8 h

Damit würden mit 259 km LKW-Strecke im Kombiverkehr rund 48% der Hauptlaufstrecke anfallen und mit 4,1 Stunden würden 59% der Hauptauffahrtzeit verbraucht werden. Den Transport von Rastatt nach Celle würde man deshalb

nicht im Kombiverkehr abwickeln. Das Beispiel unterstreicht aber zwei der oben gemachten Aussagen:

- Die Hauptlaufstrecke von rund 540 km entspricht der Hauptlaufstrecke, in der im Trampverkehr maximale Erlöse erzielt werden können, wie an anderer Stelle in dieser Arbeit hergeleitet. Wenn sich solche Transporte also nicht für den Kombiverkehr eignen, dann fällt ein sehr großer Anteil von Transporteuren als mögliche Nutzer aus.
- Laut 3.22 eignet sich für die übliche Zustellung von Tag A auf Tag B nur die Verbindung 1, und diese muss bei Zugabfahrt 17:50 Uhr spätestens um die Mittagszeit in Rastatt übernahmebereit sein.

Außer der Genehmigung zur Überschreitung der ansonsten geltenden Begrenzung auf 40 t zGG profitiert der Kombinierte Verkehr von weiteren Vorteilen:

- Fahrzeuge, die ausschließlich im Kombiverkehr eingesetzt werden, sind von der Kfz-Steuer befreit.
- Für Last- und Sattelzüge oder deren Anhänger und Auflieger kann eine Rückerstattung der KfZ-Steuer beantragt werden, wenn diese auf der rollenden Landstraße eingesetzt werden.
- Transporte im Kombinierten Verkehr sind unter bestimmten Bedingungen von Fahrverboten ausgenommen.

Das alles soll mithelfen, Güter von der Straße auf die Schiene zu bekommen, was in Abschnitt 1.1 bereits als ein Bestandteil der *Verkehrswende* benannt worden ist. Würde das Netz von Kombibahnhöfen dichter und nähme die Zahl der Zugverbindungen zu, dann stünden Kombiverkehr und HO-System in teilweiseem Wettbewerb, da die Zugverbindung den Hauptlauf auf der HO-Strecke ersetzen könnte, vor allem auf längeren Transportstrecken.

4 Mathematische Modellierung

Ziel

Das mathematische Modell soll unter Variationen von Parametern wie z.B. Diesel- oder Strompreise, Mautsätze, Kaufpreise für Fahrzeuge oder Prozentsätze unterschiedlicher Antriebsarten für untersuchte Betriebsmodelle folgende Jahreswerte ermitteln:

1. CO₂-Ausstoß SSA
2. Systemkosten C_{sys}
3. Frachterlös EF

Methode

1. Obwohl im Vordergrund die Ermittlung möglicher CO₂-Reduktionen und die Auswirkung auf die Systemkosten stehen, beginnt das mathematische Modell mit dem Abschnitt Frachterlöse, da die dort ermittelten Werte für Zahl der Be- und Entladestellen und die zugehörigen Bedingungen für Aufenthalt und Geschwindigkeit im Be- und Entladeverkehr in den Kostenberechnungen verwendet werden. Abb. 3.5 und Abschnitt 5.2 beleuchten diese Zusammenhänge.
2. Mathematische Terme werden mit Großbuchstaben gleichartig benannt. Die kleingeschriebenen Indizes verweisen auf die unterschiedlichen Modelle und/oder Antriebsarten
3. Die Ermittlung der Systemkosten C_{sys} erfolgt über Zwischenschritte:

- Anschaffungskosten CA
 - Betriebskosten CB
 - CO₂-Kosten CC
4. Die Betriebskosten CB enthalten als wesentliche Kostenblöcke die Treibstoffkosten CT und die Mautkosten CM . Bei beiden Kostenarten müssen dabei unterschieden werden:
- Strecken unter der Oberleitung S_{ho}
 - Strecken außerhalb der Oberleitung S_{hyb}
5. Der Index $_{hyb}$ steht dabei für die unterschiedlichen Antriebsarten außerhalb des Stromantriebs unter der Oberleitung (vgl. Definition in Abschnitt 1.4.2)
- $_{die}$ für Dieselantrieb
 - $_{hvo}$ für HVO-Dieselantrieb
 - $_{bat}$ für Batterieantrieb

Bei den Anschaffungskosten stehen dieselben Indizes für die unterschiedlichen Arten von Sattelzugmaschinen SZM.

6. Der Index $_{ref}$ steht für das Referenzmodell, in dem ausschließlich Diesel-SZM unterwegs sind und eine Oberleitung nicht vorhanden ist

4.1 Frachterlös EF

Der Frachterlös EF wird ermittelt in Abhängigkeit von der Hauptlaufentfernung S_{hl} und dem Frachtsatz PF .

$$EF = S_{hl} * PF \quad (4.1)$$

Der Frachtsatz ist abhängig von der Anzahl der Beladestellen ZL_{bela} und der Anzahl der Entladestellen ZL_{entla} und steigt mit deren Summenzahl. Durch Multiplikation von Ausgangsfrachtsatz PF_{ftl} für eine Komplettladung mit dem Korrekturfaktor KF_{pl} errechnen sich die unterschiedlichen Frachtsätze PF_{pli} für unterschiedliche Gewichts- oder Lademeterklassen.

$$PF_{\text{pli}} = PF_{\text{ftl}} * KF_{\text{pli}}$$

Für die Komplettladung gilt:

$$ZL_{\text{bela}} == ZL_{\text{entla}} == 1$$

Für Touren mit mehreren Be- und Entladestellen gelten folgende Verhältnisse:

Wenn zum Beispiel

$$ZL_{\text{bela}} + ZL_{\text{entla}} > 2 \text{ und } \leq 5$$

dann zum Beispiel

$$KF_{\text{pl}5} = 1,5$$

und damit

$$PF_{\text{pl}5} = PF_{\text{ftl}} * 1,5$$

und für

$$ZL_{\text{bela}} + ZL_{\text{entla}} > 5$$

zum Beispiel

$$KF_{\text{pl}10} = 2,15$$

und somit

$$PF_{\text{pl}10} = PF_{\text{ftl}} * 2,15$$

Dieses Verfahren lehnt sich an die Tabellen des Güterfernverkehrstarifs (GFT) an, in denen für unterschiedliche Entfernungsstufen für unterschiedliche Gewichtsklassen unterschiedliche Frachtsätze gelistet sind. Dabei steigen die Frachtsätze mit kleiner werdender Gewichtsklasse.

Die begrenzenden Einsatzfaktoren für Touren innerhalb einer oder mehrerer Schichtzeiten sind die gesetzlich vorgegebenen Werte für die zulässige tägliche Arbeitszeit t_{zuarb} und die zulässige Lenkzeit t_{zulenk} . In Abhängigkeit von der Zahl der Be- und Entladestellen, der dort verbrachten Warte- und Hilfszeiten t_{wart} , t_{hilf} , der Länge der Anfahrtstrecke S_{an} , der Entfernung zwischen den Be- und Entladestellen S_{bela} , S_{entla} sowie der durchschnittlichen Geschwindigkeit bei der Anfahrt v_{an} und auf den Vor- und Nachläufen v_{bela} , v_{entla} , errechnet sich die für den Hauptlauf verbleibende Zeit t_{hl} über folgende Rechenschritte, zu deren Einzelpositionen sich im Kapitel 3 Ausführungen finden:

Ermittlung der Zeiten für Anfahrt, Beladeverkehr und Entladeverkehr

$$t_{\text{an}} = S_{\text{an}} / v_{\text{an}}$$

$$t_{\text{belaver}} = (S_{\text{bela}} * (ZL_{\text{bela}} - 1)) / v_{\text{bela}}$$

$$t_{\text{entlaver}} = (S_{\text{entla}} * (ZL_{\text{entla}} - 1)) / v_{\text{entla}}$$

Ermittlung der für den Hauptlauf verbleibenden Lenkzeit

$$t_{\text{lenkhl}} \leq t_{\text{zulenk}} - t_{\text{an}} - t_{\text{belaver}} - t_{\text{entlaver}}$$

Damit kann theoretisch auch die maximale Hauptlaufstrecke ermittelt werden

$$S_{\text{hlmax}} = t_{\text{lenkhl}} * v_{\text{hl}} \quad (4.2)$$

Tatsächlich sind aber noch die diversen Anteile an Arbeitszeiten zu betrachten, wobei jetzt die Verweildauer an den Lade- und Entladestellen durchweg als Arbeitszeiten und nicht als Pausenzeiten gewertet werden:

$$t_{\text{arb}} = t_{\text{hilf}} + t_{\text{wart}}$$

$$t_{\text{wart}} = ZL_{\text{bela}} * t_{\text{bela}} + ZL_{\text{entla}} * t_{\text{entla}}$$

$$t_{\text{arb}} = t_{\text{hilf}} + ZL_{\text{bela}} * t_{\text{bela}} + ZL_{\text{entla}} * t_{\text{entla}}$$

Da die Zeiten für Hilfs- und Bereitschaftsdienste nicht quantifizierbar sind und im Traktionsverkehr nicht anders sind als im Trampverkehr, werden diese bei den nächsten Berechnungsschritten nicht mehr berücksichtigt.

$$t_{arb} = ZL_{bela} * t_{bela} + ZL_{entla} * t_{entla}$$

Unter Berücksichtigung der Randbedingung für die zulässige tägliche Arbeitszeit

$$t_{arb} + t_{lenk} \leq t_{zuarb}$$

und nach Abzug der oben ermittelten Lenkzeiten für Anfahrt, für Beladeverkehr und Entladeverkehr erhält man den Wert, der tatsächlich maximal für die Lenkzeit auf dem Hauptlauf bleibt

$$t_{hl} = t_{lenkmax} \leq t_{zuarb} - t_{arb} - t_{an} - t_{belaver} - t_{entlaver}$$

und nach Einsatz der Hauptlaufzeit und der Hauptlaufgeschwindigkeit in die Formel 4.2

$$S_{hlmax} = t_{hl} * v_{hl}$$

den maximalen Frachterlös

$$EF_{max} = S_{hlmax} * PF_{hl} \quad (4.3)$$

4.2 Gesamtkosten C_{ges}

$$C_{ges} = CA_{ges} + CB_{ges} \quad (4.4)$$

4.2.1 Anschaffungskosten CA

In die Anschaffungskosten CA fließen Kaufpreis PK , Wiederverkaufspreis PW und Nutzungsdauer tn ein, sowie die Anzahl ZF der betreffenden Fahrzeuge. Dieses gilt für die SZM und für die Trailer.

Die Anschaffungskosten der Fahrzeuge im System CA_{kfz} lauten

$$CA_{kfz} = ((PK_{szm} - PW_{szm})/tn_{szm}) * ZF_{szm} + ((PK_{tr} - PW_{tr})/tn_{tr}) * ZF_{tr}$$

Die Anschaffungskosten für die Trasse CA_{tras} ermitteln sich aus der Trassenlänge S_{tras} multipliziert mit den in €/km gemessenen spezifischen Kosten für den Trassenbau PW_{tras} dividiert durch die Nutzungszeit

$$CA_{tras} = PK_{tras} * S_{tras}/tn_{tras}$$

Ein Restwert wird nicht angenommen, dafür entfallen die Kosten für den Trassenrückbau.

Die jährlichen Kosten CU_{trak} für die Beschaffung der benötigten Trailer-Stellplätze an den Umschlagpunkten für den Traktionsverkehr werden berechnet aus der Anzahl der benötigten Stellplätze ZU_{platz} multipliziert mit den Kosten je Stellplatz PU_{platz} gemessen in €/Platz/Jahr. Dazu wird zunächst die Anzahl der Stellplätze ermittelt und berücksichtigt, dass an beiden Umschlagpunkten jeweils ein leerer Platz vorhanden sein muss, an dem ein ankommendes Fahrzeug seinen Trailer abstellen kann, bevor ein anderer aufgenommen wird. Von der Zahl der insgesamt für den Traktionsverkehr benötigten SZM ZF_{trak} wird die Zahl der SZM auf der Traktionsstrecke und die Zahl der an den Umschlagpunkten mit hybriden Antrieben eingesetzten LKW abgezogen. Wenn keine überzähligen Trailer im System vorhanden sind und alle SZM im System einen Trailer aufgesattelt

haben, dann gilt für die Ermittlung der Anzahl der benötigten Trailerstellplätze im Traktionsverkehr zwischen zwei Umschlagpunkten:

$$ZU_{\text{platz}} = ZF_{\text{trak}} - ZF_{\text{trakho}} - ZF_{\text{trakhyb}} + 2$$

$$CU_{\text{trak}} = ZU_{\text{platz}} * PU_{\text{platz}}$$

Die Anschaffungskosten CA_{ges} ermitteln sich aus der Summe der zuvor genannten Einzelpositionen

$$CA_{\text{ges}} = CA_{\text{kfz}} + CA_{\text{tras}} + CU_{\text{trak}} \quad (4.5)$$

4.2.2 Betriebskosten CB

Die Betriebskosten umfassen die Treibstoffkosten CT , die Mautkosten CM , die Reparaturkosten CR sowie die Personalkosten CP . Weitere Positionen wie Steuer und Versicherung der Fahrzeuge oder wie Kosten für Verwaltung, müssen in den Berechnungen dann nicht berücksichtigt werden, wenn sie für die zu vergleichenden Betriebsmodelle als gleich angenommen werden.

Für die Berechnung der Treibstoff- und Mautkosten, sowie für die nachfolgende Berechnung des CO_2 -Ausstoßes ist zunächst zu ermitteln, welche Anzahl SZM fahren mit welchem Antrieb auf welcher Strecke. Für alle SZM, die für den Betrieb unter der Oberleitung oder mit Batterieantrieb ausgerüstet sind, wird ein Korrekturfaktor KF_{nula} für den Nutzlastverlust eingeführt. Damit wird berücksichtigt, dass solche Fahrzeuge wegen des höheren Eigengewichts Mehrfahrten leisten müssen, um die gleiche Transportmenge zu befördern oder entsprechend mehr Fahrzeuge eingesetzt werden müssen.

Prinzipiell fallen bei einer Tour im Trampverkehr folgende Strecken an:

- Unter Anfahrtstrecke S_{an} versteht man die Strecke ab Tourbeginn bis zur ersten Beladestelle.
- Die Vorlaufstrecke ist die Summe der Strecken zwischen den Beladestellen.
- Die Hauptlaufstrecke S_{hl} ist die Strecke zwischen der letzten Beladestelle und der ersten Entladestelle.
- Die Nachlaufstrecke ist die Summe der Strecken zwischen den Entladestellen.

Dabei errechnet sich die Vorlaufstrecke aus der Anzahl der Beladestellen ZL_{bela} und der Entfernung dazwischen S_{bela} :

$$Vorlaufstrecke = S_{bela} * (ZL_{bela} - 1)$$

Für die Nachlaufstrecke gilt analog:

$$Nachlaufstrecke = S_{entla} * (ZL_{entla} - 1)$$

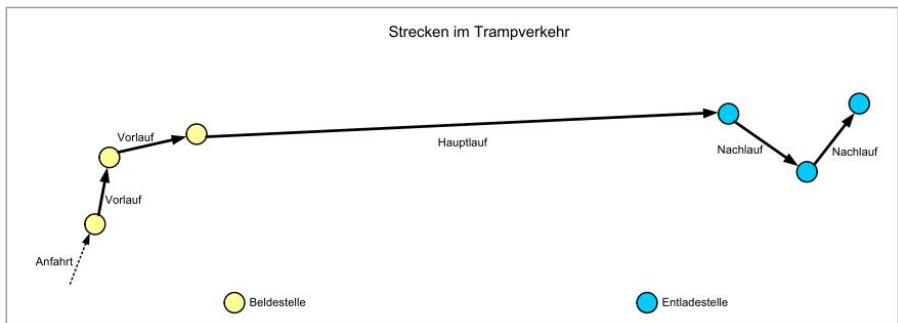


Abbildung 4.1: Streckenanteile im Trampverkehr

Im Traktionsmodell muss die gleiche Anzahl Touren wie im Trampmodell gefahren werden, es sind aber zusätzlich folgende Strecken zu berücksichtigen:

1. Für die Traktionsfahrzeuge gilt:

S_{u1} ist die Strecke, zwischen Umschlagpunkt 1 und Beginn der Traktionsstrecke

S_{trak} ist die Länge der Traktionsstrecke

S_{u2} ist die Strecke vom Ende der Traktionsstrecke bis zu Umschlagpunkt 2

2. Für die im Nahverkehr eingesetzten SZM gilt:

Zulauf S_{zu} ist die Strecke zwischen der letzten Beladestelle und dem Umschlagpunkt

Ablauf S_{ab} ist die Strecke zwischen dem Umschlagpunkt und der ersten Entladestelle

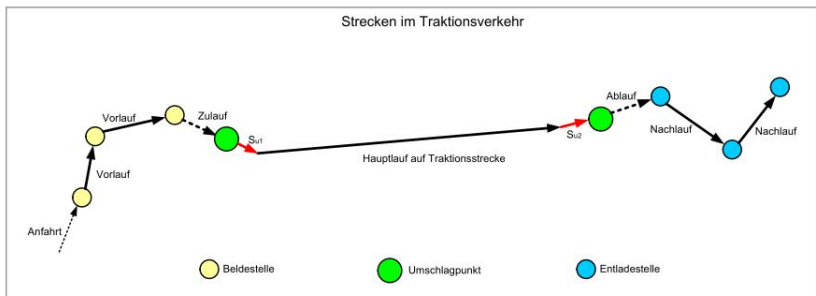


Abbildung 4.2: Streckenanteile im Traktionsverkehr

Nachdem die Streckenanteile S_i definiert worden sind, muss ermittelt werden, welche Fahrzeuge mit welcher Anzahl diese Streckenabschnitte befahren.

Im Trampmodell sind hybrid angetriebene Fahrzeuge im Einsatz, beim HO-Trampmodell auch eine Anzahl ZF_{ho} an HO-SZM mit zusätzlichem hybridem Antrieb. Bei beiden handelt es sich um SZM im Fernverkehrseinsatz.

Der Be- und Entladeverkehr im Traktionsmodell wird durch Fahrzeuge ohne HO-Ausrüstung durchgeführt (vgl. Definition in Abschnitt 1.4.2). Diese werden mit Diesel, mit HVO-Diesel oder mit Strom aus einer kleinen Traktionsbatterie angetrieben.

Die Hauptläufe auf der Traktionsstrecke und die kurzen Strecken zwischen dieser und den beiden Umschlagpunkten werden mit Traktions-SZM durchgeführt, im HO-Traktionsmodell sind das HO-SZM. Die LKW auf der Traktionsstrecke und im Nahverkehrseinsatz kehren nach Schichtende zum Einsatzort zurück und sind daher mit Nahverkehrsfahrern besetzt.

Für alle untersuchten Modelle, mit Ausnahme des Hub-Verkehrs, ist die Gesamtzahl der im System befindlichen Sattelzüge ZF_{sys} gleich groß und entspricht dem Wert 100% und der Zahl der Touren, die täglich im System abgewickelt werden müssen. Darauf beziehen sich die folgenden Prozentanteile:

FA_{trak} = Prozentsatz der SZM im Traktionsverkehr

FA_{tramp} = Prozentsatz der SZM im Trampverkehr

dabei ist

$$FA_{\text{tramp}} = 100\% - FA_{\text{trak}} \quad (4.6)$$

Für das Trampmodell errechnet sich die Zahl der im Trampverkehr laufenden Fahrzeuge mit

$$ZF_{\text{tramp}} = ZF_{\text{sys}} * FA_{\text{tramp}}$$

Da im Trampmodell kein Fahrzeug im Traktionsverkehr läuft und damit $FA_{\text{trak}} = \text{Null}$ ist, gilt

$$FA_{\text{tramp}} = 100\%$$

und damit

$$ZF_{\text{tramp}} = ZF_{\text{sys}}$$

Im Trampmodell können sowohl SZM ohne HO-Ausrüstung laufen, als auch HO-SZM. Deren Anzahl $ZF_{\text{trampoehybrnetto}}$ wird durch den Faktor FA_{ho} bestimmt:

$$ZF_{\text{trampoehybrnetto}} = ZF_{\text{tramp}} * FA_{\text{ho}}$$

Mit dem Faktor FA_{hyb} wird die Zahl ZF_{tramphyb} der SZM ermittelt, die nicht als HO-Fahrzeug ausgerüstet sind und ausschließlich mit der hybriden Antriebsquelle unterwegs sind.

$$ZF_{\text{tramphyb}} = ZF_{\text{tramp}} * FA_{\text{hyb}}$$

dabei ist

$$FA_{\text{hyb}} = 100\% - FA_{\text{ho}}$$

Die oben errechnete Anzahl der HO-SZM wird wegen der verringerten Nutzlast gegebenenfalls mit dem Faktor KF_{nula} erhöht.

$$ZF_{\text{trampoehybrbrutto}} = ZF_{\text{trampoehybrnetto}} * (100\% + KF_{\text{nula}})$$

Die HO-SZM werden nur zu einem Anteil FN_{ho} auf Oberleitungsstrecken treffen und tatsächlich im HO-Betrieb fahren. Den Rest der Strecken werden sie mit dem Anteil FN_{hyb} die hybride Antriebsquelle nutzen und dafür gilt

$$FN_{\text{hyb}} = 100\% - FN_{\text{ho}}$$

Wie im Trampmodell können auch im Traktionsmodell Fahrzeuge mit und ohne HO-Ausrüstung unterwegs sein. Es gelten folgende Beziehungen:

$$ZF_{\text{traknetto}} = ZF_{\text{sys}} * FA_{\text{trak}}$$

$$ZF_{\text{tramp}} = ZF_{\text{sys}} * FA_{\text{tramp}}$$

mit

$$FA_{\text{tramp}} = 100\% - FA_{\text{trak}}$$

Für die Fahrzeuge, die im Traktionsmodell als Trampfahrzeuge unterwegs sind, gelten die zuvor für das Trampmodell gezeigten Formeln.

Für HO-SZM oder Batterie-SZM mit verminderter Nutzlast gilt auch im Traktionsverkehr der Korrekturfaktor KF_{nula}

$$ZF_{\text{trakbrutto}} = ZF_{\text{traknetto}} * (100\% + KF_{\text{nula}})$$

Aus dieser Zahl wird über den Anteilsfaktor FA_{traktrak} die Anzahl der SZM ermittelt, welche auf der Traktionsstrecke die Hauptläufe durchführen. Dazu wurde im Abschnitt 3.2 beschrieben, dass die SZM im Pendelverkehr auf der Traktionsstrecke pro Schicht zwei Touren, eine Hin- und eine Rückfahrt, erledigen können und die SZM 2-schichtig eingesetzt sind. Daher gilt

$$FA_{\text{traktrak}} = 25\%$$

und

$$ZF_{\text{traktrak}} = ZF_{\text{trakbrutto}} * FA_{\text{traktrak}}$$

Im HO-Traktionsverkehr sind das HO-SZM, welche die sehr kurzen Strecken zwischen den Umschlagpunkten und der Traktionsstrecke mit Strom aus Traktionsbatterien überbrücken können.

$$ZF_{\text{traktrakho}} = ZF_{\text{trakbrutto}} * FA_{\text{traktrakho}}$$

Die Anzahl der Fahrzeuge, welche um die Umschlagpunkte den Belade- und Entladeverkehr abwickeln, wird über den Anteilsfaktor FA_{traknah} ermittelt. Auch für diese Fahrzeuge wurden die Einsatzbedingungen im Abschnitt 3.2 beschrieben. Die Zahl der Touren und die Bedingungen im Be- und Entladeverkehr sind identisch mit denen im Trampverkehr. Unter Berücksichtigung des Wegfalls von

Hauptlauf und Hinzunahme von Zu- und Ablauf lassen sich Lenk- und Arbeitszeiten errechnen. Teilt man deren Summe durch die zulässige Tagesarbeitszeit, so erhält man unter Berücksichtigung der zulässigen Tageslenkzeit die Anzahl der notwendigen Nahverkehrsfahrzeuge $ZF_{traknah}$. Setzt man diese ins Verhältnis zu der zuvor ermittelten Zahl $ZF_{trakbrutto}$ dann erhält man $FA_{traknah}$. Für gleiche Tourbedingungen nähert sich dieser Faktor mit steigendem $ZF_{trakbrutto}$ einem stabilen Wert, der dann für beliebige Modellgrößen in folgende Formel eingesetzt werden kann.

$$ZF_{traknahhyb} = ZF_{trakbrutto} * FA_{traknah}$$

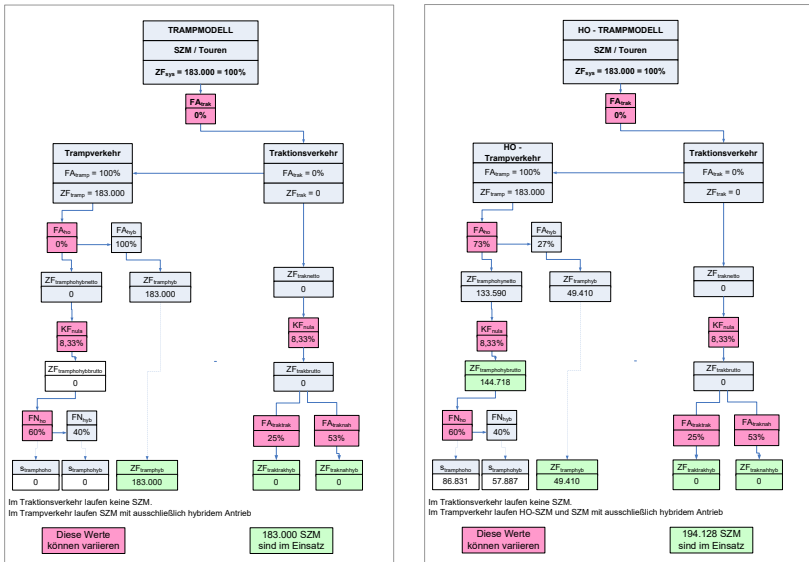


Abbildung 4.3: Beispiele für Ermittlung der Anzahl von SZM im Trampmodell

Damit ist die Anzahl aller im System laufenden Fahrzeugtypen mit ihren unterschiedlichen Antrieben und Einsätzen bekannt und es können für alle Varianten

die jährlichen Fahrleistungen S_{jll} ermittelt werden. Daraus ergibt sich die jährliche Fahrleistung im System zu

$$S_{jll} = \sum_{i=1}^n ZF_i * s_{jll_i} \quad (4.7)$$

4.2.2.1 Treibstoffkosten CT

Zunächst werden die Treibstoffverbräuche V_i auf den oben ermittelten Teilstrecken S_i ermittelt. Dazu werden diese mit den zugehörigen spezifischen Verbräuchen VT_i multipliziert und die Werte in Litern oder Kilowattstunden ausgegeben.

$$V_i = S_i * VT_i \quad (4.8)$$

Soweit es sich um SZM handelt, die mit Strom aus der Oberleitung oder aus der Traktionsbatterie angetrieben werden, wird für die mit Strom zurückgelegte Teilstrecke die Größe der Rekuperation mit dem Faktor KF_{rekup} berücksichtigt.

$$V_{\text{hoi}} = V_i * (100\% - KF_{\text{rekup}})$$

Die gesuchten Treibstoffkosten CT_i auf den Teilstrecken errechnen sich aus den ermittelten Verbräuchen und den zugehörigen Treibstoffpreisen PT_i .

$$CT_i = V_i * PT_i$$

Dabei werden folgende Parameter berücksichtigt:

- VT_{ho} spezifischer Stromverbrauch bei Oberleitungsbetrieb
- VT_{bat} spezifischer Stromverbrauch bei Batteriebetrieb
- VT_{die} spezifischer Treibstoffverbrauch bei Dieselbetrieb
- VT_{hvo} spezifischer Treibstoffverbrauch bei HVO-Dieselbetrieb

- PT_{ho} Preis für Strom aus der Oberleitung
- PT_{bat} Preis für Strom aus der Traktionsbatterie
- PT_{die} Preis für Dieselkraftstoff
- PT_{hvo} Preis für HVO-Dieselmkraftstoff

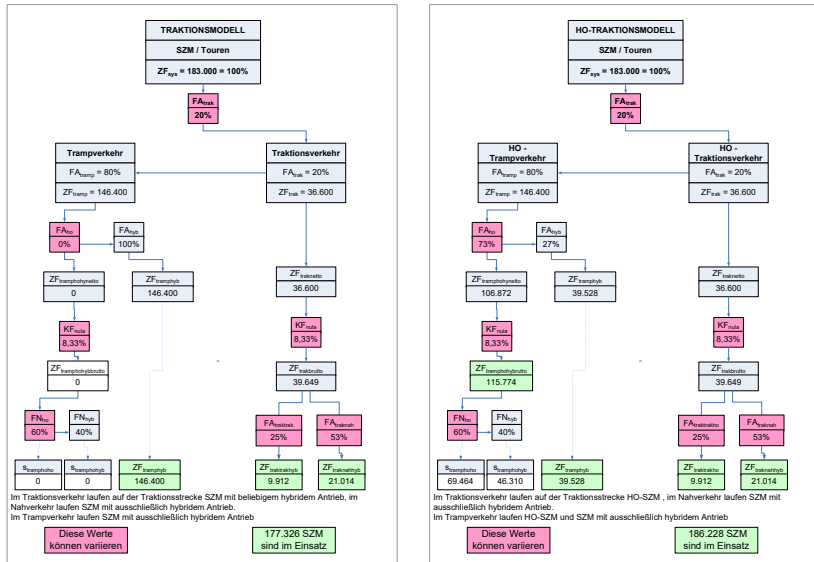


Abbildung 4.4: Beispiele für Ermittlung der Anzahl von SZM im Traktionsmodell

Die Gesamtkosten für Treibstoffe über alle Teilstrecken ergeben sich durch:

$$CT = \sum_{i=1}^n V_i * PT_i \quad (4.9)$$

4.2.2.2 Mautkosten CM

Zur Ermittlung der Mautkosten wird auf die oben ermittelten Strecken zugegriffen und überprüft, ob diese Strecken generell mautpflichtig sind und gegebenenfalls für welche Fahrzeuge. Die Strecken S_{traktrak} , auf denen die Traktions-SZM im Pendelverkehr im Einsatz sind, werden immer Autobahnstrecken und damit immer auch mautpflichtig sein. Eine Ausnahme stellt die Mautbefreiung für HO-SZM dar, welche zeitweise auf den deutschen Teststrecken galt. Für alle anderen Strecken wird über den Faktor KF_{maut} berücksichtigt, dass auch mautfreie Strecken benutzt werden, wie Kreisstraßen oder innerörtliche Straßen.

$$S_{\text{mauti}} = S_i * (100\% - KF_{\text{mauti}}) \quad (4.10)$$

Zur Ermittlung der Mautkosten CM_i auf den Teilstrecken werden die nach dieser Prüfung mautpflichtigen Teilstrecken mit den dafür in Frage kommenden Mautsätzen PM_i multipliziert.

$$CM_i = S_{\text{mauti}} * PM_i \quad (4.11)$$

Dabei werden folgende Mautsätze berücksichtigt:

- PM_{ho} Mautsatz für HO-SZM im HO-Betrieb
- PM_{hohyb} Mautsatz für HO-SZM im hybriden Betrieb
- PM_{die} Mautsatz für SZM im Dieselmotorbetrieb
- PM_{hvo} Mautsatz für SZM im HVO-Dieselmotorbetrieb
- PM_{bat} Mautsatz für SZM im Batteriebetrieb

Die Mautkosten im System errechnen sich aus der Summe der Mautkosten auf den Teilstrecken.

$$CM = \sum_{i=1}^n S_{\text{mauti}} * PM_i \quad (4.12)$$

4.2.2.3 Reparaturkosten CR

Die Reparaturkosten für die Fahrzeuge ergeben sich für jede Fahrzeugart jeweils aus dem Produkt aus Kaufpreis PK mit einem prozentualen Faktor FR_{rep} . Für ausschließlich elektrisch angetriebene SZM werden die so ermittelten Reparaturkosten um einen Faktor FR_{homin} reduziert. Denn bei reinem Elektroantrieb wird der Reparaturaufwand als geringer angenommen als im Verbrennerantrieb, obwohl nach Kühnel et al. (2018, S 56) zwar der Reparaturaufwand bei mechanischen Antriebskomponenten entfällt, aber im Falle der HO-SZM die Wartung des Pantografen hinzukommt.

Die Reparaturkosten für die Elektrotrasse werden analog ermittelt: Trassenlänge multipliziert mit spezifischen Baukosten ergeben die Anschaffungskosten und diese werden mit dem Faktor FR_{tras} multipliziert.

Damit gilt für die Reparaturkosten die folgende Formel:

$$CR_{\text{ges}} = ZF_{\text{hyb}} * PK_{\text{hyb}} * FR_{\text{hyb}} + ZF_{\text{ho}} * PK_{\text{ho}} * FR_{\text{ho}} * (100\% - FR_{\text{homin}}) + CA_{\text{tras}} * FR_{\text{tras}} \quad (4.13)$$

4.2.2.4 Personalkosten CP

Die Personalkosten umfassen für alle untersuchten Modelle die Kosten für das Fahrpersonal. Dabei wird unterschieden, ob dieses im Nahverkehr oder im Fernverkehr eingesetzt ist. Berücksichtigt werden Gehalt und Spesen. Zusätzlich wird das Personal für die Disposition berücksichtigt, da sich deren Anzahl je Modell unterscheiden kann.

Jedes Fahrzeug muss mit einem Fahrer besetzt sein. Damit ist die Anzahl der Fahrer ZP identisch mit der Anzahl der Fahrzeuge ZF und es gilt

$$ZP_{\text{fern}} = ZF_{\text{fern}}$$

und

$$ZP_{\text{nah}} = ZF_{\text{nah}}$$

Im Traktionsverkehr werden die SZM auf der Traktionsstrecke im Zweischichtbetrieb eingesetzt, daher gilt dort

$$ZP_{\text{traktrak}} = 2 * ZF_{\text{traktrak}}$$

Alle Fahrer müssen für Urlaubs- und Krankheitszeiten ersetzt werden. Die Urlaubstage werden mit ZZ_u erfasst, die Krankheitstage mit ZZ_{kra} . Die Summe dieser Abwesenheitstage wird auf die Zahl der Einsatztage pro Jahr ZZ_{et} bezogen und ergibt den prozentualen Aufschlag KF_{zf} auf die zuvor ermittelte Anzahl von Fahrern.

$$KF_{\text{zf}} = (ZZ_u + ZZ_{\text{kra}}) / ZZ_{\text{et}}$$

Damit beläuft sich die tatsächliche benötigte Zahl von Nahverkehrsfahrern auf

$$ZP_{\text{nahtat}} = ZP_{\text{nah}} * (100\% + KF_{\text{zfnah}})$$

Für Fernfahrer gilt entsprechend

$$ZP_{\text{ferntat}} = ZP_{\text{fern}} * (100\% + KF_{\text{zffern}})$$

und für die Fahrer auf den Traktionsfahrzeugen

$$ZP_{\text{traktraktat}} = ZP_{\text{traktrak}} * (100\% + KF_{\text{zfnah}})$$

Bei der Ermittlung der Dispositionskosten zeigt der Faktor FP_{nodis} welche Anzahl von Fahrzeugen durch einen Disponenten gesteuert werden kann. Die theoretisch notwendige Zahl der Disponenten im System ergibt sich demnach aus

$$ZP_{\text{dis}} = ZF_{\text{sys}} / FP_{\text{nodis}}$$

Auch hier muss für den Ersatz der Urlaubs- und Krankheitstage der Faktor KF_{zudis} ermittelt werden:

$$KF_{\text{zudis}} = (ZZ_{\text{udis}} + ZZ_{\text{kradis}}) / ZZ_{\text{et}}$$

Die tatsächliche benötigte Anzahl von Disponenten ergibt sich aus

$$ZP_{\text{dstat}} = ZP_{\text{dis}} * (100\% + KF_{\text{zudis}})$$

Die so ermittelten Personalzahlen ZP für Fahrer und Disponenten werden mit den zugehörigen Bruttojahresgehältern CP multipliziert und ergeben die Gehaltszahlungen im System.

$$CP_{\text{gehalt}} = ZP_{\text{ferntat}} * CP_{\text{fern}} + ZP_{\text{nahtat}} * CP_{\text{nah}} + ZP_{\text{dstat}} * CP_{\text{dis}}$$

Zur Ermittlung der Kosten für Spesen CP_{spe} werden die zu besetzenden Fahrzeuge mit den zugehörigen Spesensätzen CP_{spe} und den Einsatztagen multipliziert.

$$CP_{\text{spe}} = (ZF_{\text{fern}} * CP_{\text{spefern}} + ZF_{\text{nah}} * CP_{\text{spenah}} + 2 * ZF_{\text{traktrak}} * CP_{\text{spenah}}) * ZZ_{\text{et}}$$

Damit ergeben sich die Personalkosten im Betriebsmodell CP_{ges} zu

$$CP_{\text{ges}} = CP_{\text{gehalt}} + CP_{\text{spe}} \quad (4.14)$$

und die Betriebskosten im Betriebsmodell CB_{ges} sind damit bekannt

$$CB_{\text{ges}} = CT_{\text{ges}} + CM_{\text{ges}} + CR_{\text{ges}} + CP_{\text{ges}} \quad (4.15)$$

4.3 CO₂-Kosten CC

Ermittlung des Schadstoffausstoßes

Im Abschnitt Betriebskosten wurden für den Fahrbetrieb bereits die Treibstoffverbräuche V_i ermittelt. Durch Multiplikation mit dem CO₂-Äquivalent FC_i des

dabei verbrauchten Treibstoffes erhält man den Wert des CO₂-Ausstoßes in Tonnen. Diese Werte müssen korrigiert werden, wenn:

1. im Falle von HO-Betrieb oder Batteriebetrieb ein Anteil KF_{gs} *Grüner Strom* verwendet wird.
2. im Falle von HVO-Dieselmotorbetrieb die versprochene Schadstofffreiheit mit dem Faktor KF_{hvo} angerechnet werden kann.

Der Schadstoffausstoß SSA_{kfz} der Fahrzeuge wird ermittelt über die Formel

$$\begin{aligned} SSA_{kfz} = & V_{die} * FC_{die} + V_{ho} * FC_{ho} * (100\% - KF_{gs}) \\ & + V_{bat} * FC_{bat} * (100\% - KF_{gs}) \\ & + V_{hvo} * FC_{hvo} * (100\% - KF_{hvo}) \end{aligned}$$

Für die Trasse wird deren Länge mit deren spezifischem Schadstoffausstoß FC_{tras} multipliziert,

$$SSA_{tras} = S_{tras} * FC_{tras}$$

Damit ist der Schadstoffausstoß bekannt

$$SSA_{ges} = SSA_{kfz} + SSA_{tras} \quad (4.16)$$

Ermittlung der CO₂-Kosten Die gesuchten CO₂-Kosten erhält man durch Multiplikation des Schadstoffausstoßes, gemessen in Tonnen, mit dem Faktor PC_{zert} , gemessen in €/t

$$CC_{ges} = SSA_{ges} * PC_{zert} \quad (4.17)$$

4.4 Systemkosten C_{sys}

Die Systemkosten für die untersuchten Modelle errechnen sich jeweils aus der Summe der zuvor ermittelten Einzelpositionen

$$C_{sys} = CA_{ges} + CB_{ges} + CC_{ges} \quad (4.18)$$

5 Parameterstudien

Unter Verwendung der in Kapitel 4 dargestellten Formeln wird für die 3 Zielwerte

Frachterlöse

Systemkosten

CO₂-Ausstoß

ermittelt, wie diese sich verändern, wenn Parameter geändert werden und welche Parameteränderungen die größten Änderungen bei den Zielwerten bewirken. Untersucht werden die folgenden Betriebsmodelle, in denen arbeitstäglich jeweils die gleichen 183.000 Touren zu fahren sind:

Trampmodelle

Traktionsmodelle

Hub-Modell

Folgende Antriebsvarianten sind dabei im Einsatz:

- Hauptantriebe ohne hybriden Zusatzantrieb

Dieselantrieb (Referenz)

HVO-Dieselantrieb

Batterieantrieb

- Hybride Antriebe in Kombination mit dem HO-Antrieb

HO-Dieselantrieb (Referenz)

HO-HVO-Dieselantrieb

HO-Batterieantrieb

Durch Kombination der Antriebsarten mit Tramp- und Traktionsmodell werden Ergebnisse für 12 Varianten ermittelt. Das erlaubt bei ansonsten unveränderten Parametern den Vergleich unterschiedlicher Antriebe innerhalb gleichartiger Betriebsmodelle, den Vergleich zwischen Transportdurchführung im Tramp- oder Traktionsmodell und den Vergleich zwischen Modellen mit und ohne eWay.

Für das Hub-Modell wurde im Vergleich zum jetzigen Dieselantrieb ermittelt, wie sich CO₂-Ausstoß und Kosten verändern, wenn die Hub-Verkehre entweder nur über ein eigenes Hub-Netz laufen, wie in Abb. 3.18 gezeigt, oder zusätzlich noch über weitere eWay, wie in der Fallstudie in Kapitel 6 angenommen.

5.1 Basis-Parameter

In den Modellrechnungen dieser Arbeit wurden dieselben Basisparameter verwendet. Sie sind in drei Listen zusammengefasst und im Anhang (Kapitel A) nachzulesen. Zur Herleitung und zu den Quellen einiger Kostenarten folgen zusätzliche Angaben:

Die **LKW-Anschaffungskosten** sind nicht für alle in den diversen Modellen laufenden SZM bekannt und müssen geschätzt werden. Die entsprechende Unterlage ist im Anhang als Tabelle A.1 abgelegt. In Hacker, Blanck et al. (2020, S 23) beurteilt man die Anschaffungskosten für ein elektrisches Fahrzeug mit 25% bis 50% Mehrkosten gegenüber einem vergleichbaren Dieselfahrzeug. Tatsächlich liegen die inoffiziellen Auskünfte von Mercedes und Iveco (Preislisten für die Batterie-SZM mit hoher Reichweite liegen noch nicht vor) bei rund dem Dreifachen.

Auch **Nutzungsdauern und Wiederverkaufswerte** sind noch nicht bekannt. Die Nutzungsdauer wurde, unabhängig von der Antriebsart, mit fünf Jahren angesetzt. Das deckt sich mit den Angaben in Göckeler, Haase et al. (2022, S 54), wo für Sattelzugmaschinen 5,6 Jahre genannt werden. Für die SZM im Traktionspendelverkehr wurde die Nutzungsdauer auf drei Jahre verkürzt, da diese Fahrzeuge durchgängig im Zweischichtbetrieb eingesetzt sind und hohe jährliche Fahrleistungen erreichen.

Für **Reparaturkosten** wurden die Sätze aus Wietschel, Gnann et al. (2017) übernommen, unter Berücksichtigung der Einlassungen in Kühnel et al. (2018, S 56) zu vermindertem Reparaturaufwand.

Die **Treibstoffkosten** für Diesel, HVO-Diesel und Strom sind Werte aus dem 1. Halbjahr 2024.

Die Werte für die **LKW-Maut** wurden der Homepage (www.tollcollect.de) entnommen. Die Mauttabelle für 2024 findet sich im Anhang.

Der **Nutzlastverlust** wurde ermittelt aus dem Vergleich der auf dem eWayBW eingesetzten LKW mit denen konventioneller Diesel-SZM im Fuhrpark desselben Unternehmens. Das Mehrgewicht von zwei Tonnen bedeutet, bezogen auf eine Nutzlast von 24 Tonnen, einen Nutzlastverlust von rund 8,3%. Unter Berücksichtigung der Prognose in Wietschel, Gnann et al. (2017, S 107), wonach bis 2030 eine Verdoppelung der Energiedichten von Batterien zu erwarten sei, wird der Nutzlastverlust für HO-Fahrzeuge und für Batteriefahrzeuge halbiert und mit dem Korrekturfaktor $KF_{\text{nula}} = 4,165\%$ angesetzt. Wie groß die Zahl vom Nutzlastverlust betroffener Fahrzeuge ist, kann nur abgeschätzt werden: Bei den in den Vergleichsrechnungen dieser Arbeit berücksichtigten Fahrzeugen handelt es sich um die schwere Gewichtsklasse der SZM, die bauartbedingt (Ausnahme Jumbofahrzeuge) für den Transport schwerer Lasten geeignet ist. Elbert et al. (2014) stellen fest, dass der Nutzlastverlust gerade im Trampverkehr gravierend ist und laut A. Marx (1967) war Trampverkehr zumindest anfangs die überwiegende Transportart. Im Systemverkehr wird mit kurzgekuppelten Gespannen und mittels Doppelstockverladung versucht, möglichst große Mengen zu befördern, meist mit Blick auf Laderaum. Beide Maßnahmen bedingen höhere Fahrzeuggewichte und

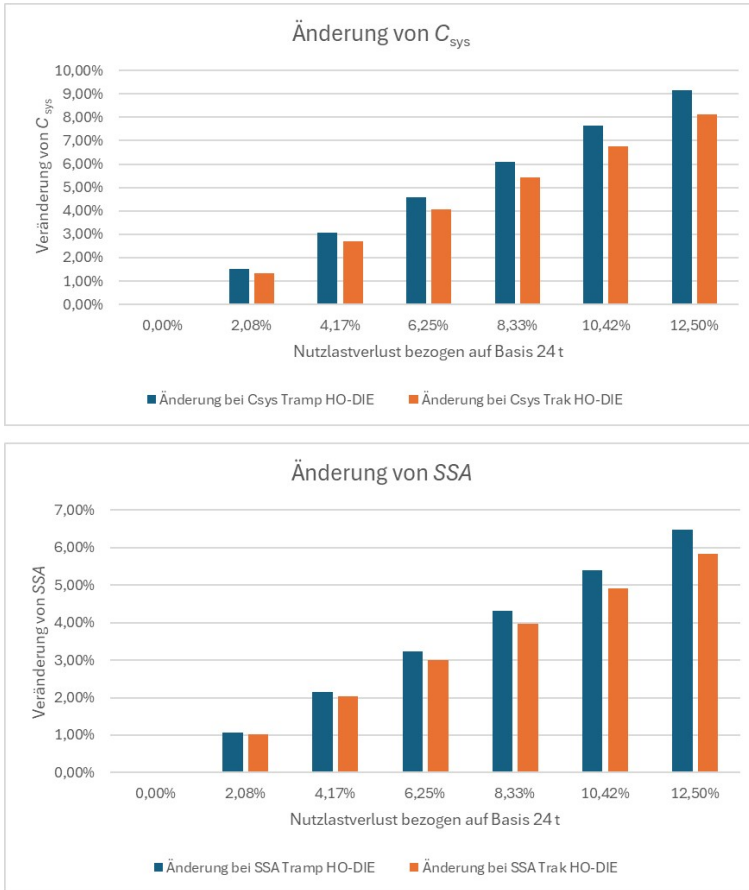


Abbildung 5.1: Einfluss von Nutzlastverlust auf C_{sys} und SSA

begrenzen die Nutzlast. Wird der Nutzlastverlust größer, dann steigen die Systemkosten und der Schadstoffausstoß. In Abb. 5.1, wo der Nutzlastverlust schrittweise um jeweils 500 kg zunimmt, zeigen sich ähnliche Verläufe für Tramp- und für Traktionsverkehr. In beiden Fällen sind die prozentualen Veränderungen bei den Systemkosten größer als beim Schadstoffausstoß, dabei sind die Auswirkungen

auf den Traktionsverkehr jeweils geringer. Die im Traktionsverkehr auf der Pendelstrecke eingesetzten SZM werden in jedem Fall vom Nutzlastverlust betroffen sein, da diese auch gewichtsmäßig voll ausgelastete Auflieger ziehen müssen.

Der **Laderaumverlust** wird nicht berücksichtigt, da dieser nicht so eindeutig quantifizierbar ist. Außerdem wird in Gökeler, Haase et al. (2022, S 35) darauf hingewiesen, dass Laderaumverlust im Vergleich zu Nutzlastverlust nach einer Untersuchung im Zusammenhang mit Studien zum Bundesverkehrswegeplan unter den Befragten als weniger wichtig eingestuft worden ist.

Für die Ermittlung der **Personalkosten** wurden aus dem Kreis mittelständischer Spediteure Jahresgehälter und Spenssätze erfragt und gemittelt.

Kfz-Steuer und Versicherungsprämien wurden aus dem Kreis mittelständischer Spediteure erfragt und gemittelt.

Die Zahl der **Einsatztage** wurde mit 240 angesetzt und liegt damit unter der Angabe in Wietschel, Gnann et al. (2017, S 136) wo man von 260 Tagen ausgeht. Befragungen am 16.09.2024 in einer Gruppe von 12 Spediteuren haben ergeben, dass bei allen Befragten aufgrund von Fahrermangel LKW zeitweise nicht eingesetzt werden können und nicht mehr als 240 Einsatztage je Fahrzeug erreicht werden. Dadurch werden auch in keinem der befragten Betriebe noch jährliche Fahrleistungen von 100.000 km erreicht und liegen eher bei 80.000 km. Die SVG Zentrale in Frankfurt bestätigt diese Aussagen (Telefonat am 09.04.2025 mit V. Klonnek), rechnet in den Fahrzeugkalkulationen derzeit aber immer noch mit durchschnittlich 250 Einsatztagen.

Die **Baukosten der eWay-Trasse** stammen aus Wietschel, Gnann et al. (2017) und beziehen sich auf die Ausbaustufe 4 mit einer Länge von 4.000 km. In Hacker, Jöhrens et al. (2020, S 17) wird mit 2,5 Mio. Euro ein um 25% höherer Satz genannt. Plötz, Gnann et al. (2018, S 9) verweisen darauf, dass mit zunehmender Teilnehmerzahl am HO-Verkehr die Auslegung des Stromnetzes angepasst werden muss und entsprechend teurer wird.

Die **Kosten für Umschlagpunkte** konnten auf Basis von Preisen für Freiflächen in den Berechnungen mit 500 € je Trailerstellplatz und Jahr nur geschätzt werden.

- Faktor Nutzung HO-Strecke FN_{ho}
- Faktor Anteil Traktionsverkehr FA_{trak} und $FA_{traktrak}$

Dabei bedeutet $FA_{ho} = 0$, dass es keine HO-SZM im System gibt und nur Fahrzeuge mit Diesel-, HVO-Diesel- oder Batterieantrieb unterwegs sind.

Ist $FN_{ho} = 60\%$, dann fahren HO-SZM 60% ihrer jährlichen Laufleistung mit Stromantrieb unter einer Oberleitung.

Ist $FA_{trak} = 20\%$, dann laufen 20% der SZM im System im Traktionsverkehr, ohne dass dabei eine Aussage getroffen ist, in welchem Antrieb. Wohl aber ist dadurch bestimmt, dass laut Formel 4.6 ein Anteil von 80% der SZM im Trampverkehr läuft.

Ist $FA_{traktrak} = 25\%$, dann laufen 25% der im Traktionsverkehr insgesamt eingesetzten SZM im Pendelverkehr auf der Traktionsstrecke.

Die Tabellen 5.1 zeigen für die Basiseinstellungen, in denen auch HO-SZM volle Maut zahlen, die Systemkosten C_{sys} und den Schadstoffausstoß SSA in absoluten Zahlen und sie verdeutlichen die Größenordnung beider Zielwerte. Für Strom aus der Oberleitung und für Strom aus der Traktionsbatterie wurde kein CO_2 -Ausstoß angesetzt (vergleiche die Ausführungen in Abschnitt 5.3) und dem HVO-Diesel wurde ein Reduktionspotenzial von 90% angerechnet.

In den folgenden Abschnitten wird mit den dort gezeigten prozentualen Veränderungen auf die Werte aus den Tabellen 5.1 Bezug genommen.

5.2 Frachterlöse

Über die Bedingungen im Be- und Entladeverkehr (Vor- und Nachläufe) und deren Auswirkungen auf Hauptlaufentfernung und Frachterlöse wurde im Abschnitt 3.4 bereits berichtet und im Kapitel 4 wurde dargestellt, wie Frachterlöse berechnet werden.

Mit den Einstellungen:

- Entfernung zur ersten Ladestelle = 40 km
- Geschwindigkeit zur ersten Ladestelle = 65 km/h
- Entfernung im Be- und Entladeverkehr zwischen 2 Stellen = 30 km
- Geschwindigkeit bei Fahrten zwischen 2 Stellen = 50 km/h
- Geschwindigkeit auf dem Hauptlauf = 75 km/h

Tabelle 5.1: Absolute Werte für Systemkosten und CO₂-Ausstoß

Trammodelle mit Maut für HO-SZM					
	Systemkosten C_{sys} [€]				SSA [t]
	PC zert = 45 €	PC zert = 90 €	PC zert = 135 €	PC zert = 180 €	
Diesel	35.842.256.219 €	36.823.918.288 €	37.805.580.356 €	38.787.242.425 €	21.814.713
HVO-Diesel	35.430.065.877 €	35.528.232.084 €	35.626.398.291 €	35.724.564.498 €	2.181.471
Batterie	40.152.822.557 €	40.152.822.557 €	40.152.822.557 €	40.152.822.557 €	0
HO-Diesel	36.510.685.179 €	37.150.561.597 €	37.790.438.015 €	38.430.314.433 €	14.219.476
HO-HVO-Diesel	36.463.633.537 €	36.750.111.610 €	37.036.589.683 €	37.323.067.757 €	6.366.179
HO-Batterie	41.005.685.450 €	41.007.485.450 €	41.009.285.450 €	41.011.085.450 €	40.000

Traktionsmodelle mit Maut für HO-SZM					
	Systemkosten C_{sys} [€]				SSA [t]
	PC zert = 45 €	PC zert = 90 €	PC zert = 135 €	PC zert = 180 €	
Diesel	35.361.097.156 €	36.325.212.256 €	37.289.327.355 €	38.253.442.455 €	21.424.780
HVO-Diesel	34.953.913.569 €	35.050.325.079 €	35.146.736.589 €	35.243.148.099 €	2.142.478
Batterie	38.498.735.311 €	38.498.735.311 €	38.498.735.311 €	38.498.735.311 €	0
HO-Diesel	35.564.365.834 €	36.122.140.353 €	36.679.914.872 €	37.237.689.391 €	12.394.989
HO-HVO-Diesel	35.324.806.443 €	35.382.203.894 €	35.439.601.346 €	35.496.998.798 €	1.275.499
HO-Batterie	39.394.727.237 €	39.396.527.237 €	39.398.327.237 €	39.400.127.237 €	40.000

und den weiteren Einstellungen in Anlehnung an Göckeler, Haase et al. (2022, Seite 8), „typische Standzeiten summieren sich auf durchschnittlich 16 Std. am Tag, ca. 3 Stunden entfallen auf das Be- und Entladen“:

- Verweildauer an Ladestellen = 0,75 h

- Verweildauer an Entladestellen = 1,0 h

sowie den gesetzlichen Vorgaben:

- erlaubte tägliche Arbeitszeit = 9,6 h
- erlaubte tägliche Lenkzeit = 9 h

und den Frachtsätzen:

- $PF_{\text{fil}} = 1,50 \text{ €/km}$ für $ZL_{\text{bela}} = ZL_{\text{entla}} = 1$
- $PF_{\text{pl5}} = 2,15 \text{ €/km}$ für $ZL_{\text{bela}} + ZL_{\text{entla}} > 2$ und ≤ 5
- $PF_{\text{pl10}} = 3,25 \text{ €/km}$ für $ZL_{\text{bela}} + ZL_{\text{entla}} > 5$

ermittelt ein Optimierungslauf folgendes Ergebnis:

- 2 Beladestellen
- 1 Entladestelle
- Frachtsatz 2,15 €/km
- Hauptlaufentfernung = 441 km
- Frachterlös 948 €

Addiert man zur ermittelten Hauptlaufentfernung von 441 km die 70 km für die Anfahrt und für Vor- und Nachläufe, dann erhält man 511 km für die arbeits-tägliche Fahrtstrecke und rund 123 TSD. Kilometer für die Jahreslaufleistung. Dieses deckt sich mit den Zahlen aus Gnann (2017, S 11), wo im Jahr 2030 für die SZM 130 TSD. Kilometer angenommen werden. Die eigenen Zahlen ergeben einen durchschnittlichen Frachterlös im Trampverkehr von 1,83 € je gefahrenem Kilometer. Die Systemkosten betragen 35.842.256.219 €, wie in Tab. 5.1 dargestellt.

Eine deutlich höhere Fracht von 1.336 € ließe sich erzielen, wenn die Entfernung zwischen den Be- und Entladestellen nur 20 km betragen würde, die Geschwindigkeit auf Vor- und Nachläufen auf 60 km/h erhöht und die Verweildauer an Be- und Entladestellen auf 0,5 Stunden reduziert werden könnte. Dann wären fünf Stellen zu bewältigen und der Frachtsatz würde auf 3,25 €/km steigen. Mit der geringfügig kürzeren Hauptlaufdistanz von 411 km, aber der längeren Strecke im Be- und Entladeverkehr beträgt die Gesamtstrecke je Tour unverändert 511 km, was einem Leerfahrtanteil von rund 14% entspricht. Bei gleichen Systemkosten und unveränderten CO₂-Ausstoß ließe sich demnach eine Erlössteigerung von rund 40% erzielen.

Mit Blick auf tatsächliche Abläufe an den Be- und Entladestellen wird deutlich, dass eine Verweildauer von nur 30 Minuten in Einzelfällen vorkommen kann. Im Regelfall wird diese aber schon damit aufgebraucht, dass der Fahrer vom Fahrzeug zum Annahmeschalter geht, dort die Papiere vorlegen kann und nach Prüfung hört, an welche Rampe er ansetzen muss. Bis er dort sein Fahrzeug geöffnet hat und schließlich angedockt hat, werden in den allermeisten Fällen mindestens 20 Minuten vergangen sein und nun erfolgt erst die Entladung mit eventuellem Leerguttausch und Bearbeitung der Papiere. Auch die Entfernung zwischen einzelnen Be- und einzelnen Entladestellen kann schon innerhalb des Stadtgebietes von Großstädten bereits größer als 20 km sein. So verwundert es nicht, dass Frachtführer sich hauptsächlich den Komplettladungen widmen. Die Raben-Group, einer der großen europäischen Transporteure, wirbt damit sogar auf den Planen und Rückwänden ihrer Trailer, wie in Abb. 5.3 zu sehen ist.

Unter den genannten Aspekten muss der Frachterlös von 948 € als eher realistisch angenommen werden, und das ergibt einen jährlichen Frachtumsatz von rund 225 Tsd. Euro je Fahrzeug.

Für die beiden Effektdiagramme 5.4 und 5.5 nach Siebertz et al. (2017) wurden die drei Faktoren jeweils um 25% vom Ausgangswert nach oben und unten verändert. Es zeigen sich bei Veränderung der Faktoren A und B die erwarteten Verläufe. Die deutlich größte Wirkung zeigt sich in beiden Diagrammen bei der Änderung von Faktor C, der Verweildauer an den Be- und Entladestellen.



Abbildung 5.3: Mit Full Truck Load unterwegs

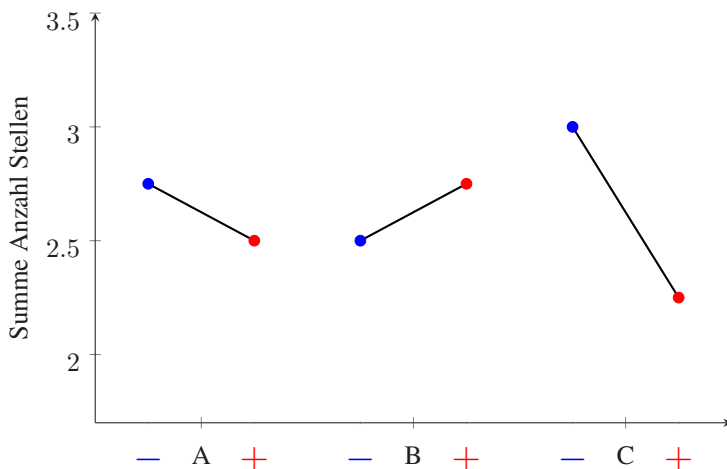


Abbildung 5.4: Zahl Be- und Entladestellen in Abhängigkeit von den Faktoren A (Entfernung), B (Geschwindigkeit) und C (Verweildauer) bei Vor- und Nachläufen.

5.3 CO₂-Ausstoß

Der CO₂-Ausstoß ist abhängig vom CO₂-Äquivalent der verwendeten Antriebsenergie und der damit zurückgelegten Strecke. In der Basiseinstellung werden folgende Werte verwendet:

- co2e für Strom aus der Oberleitung = 0,000401 t/kWh
- co2e für Strom aus der Batterie = 0,000401 t/kWh
- co2e für Diesel = 0,00324 t/l
- co2e für HVO100-Diesel = 0,00324 t/l

Für Strom aus der Oberleitung und für Strom aus der Batterie werden dieselben CO₂-Äquivalente verwendet, da dieser aus derselben Quelle kommend angenommen wird. Bei der Betrachtung WtW muss zusätzlich der Fußabdruck der Batterieherstellung beachtet werden. Zu dessen Berechnung wird der einmalige CO₂-Ausstoß bei der Batterieerzeugung auf die Lebensdauer der Batterie, gemessen in Kilowattstunden, bezogen. Helmers und P. Marx (2012) nennen dazu Werte zwischen 52 und 250 kg/kWh. Göckeler, Hacker et al. (2020, S 51) geben an, dass die Herstellung der mitgeführten Batterie in Größe von 175 kWh die Treibhausgasemissionen eines HO-LKW um 3 bis 7% steigen lässt. Durch bessere Produktionsbedingungen und Batterierecycling besteht die Möglichkeit, den Fußabdruck der Batterie in Zukunft zu verkleinern. In dieser Arbeit wird der Fußabdruck der Batterieherstellung nicht berücksichtigt, da die Batterie Bestandteil des Elektroantriebs ist und für die Fahrzeugteile der anderen Antriebe ebenfalls kein CO₂-Fußabdruck berücksichtigt worden ist.

Bei Modellen mit einem eWay kommt der laut Wietschel, Gnnann et al. (2017) und auch nach eigenen Berechnungen zu vernachlässigende Ausstoß der Trasse mit 10 t/km hinzu. Für die Energiequellen Strom und HVO100-Diesel wird deren CO₂- Reduktionspotential mit folgenden Werten angesetzt:

- Faktor Grüner Strom $KF_{gs} = 100\%$

- Faktor HVO100 $KF_{\text{hvo}} = 90\%$
- Für Diesel gibt es einen solchen Faktor nicht

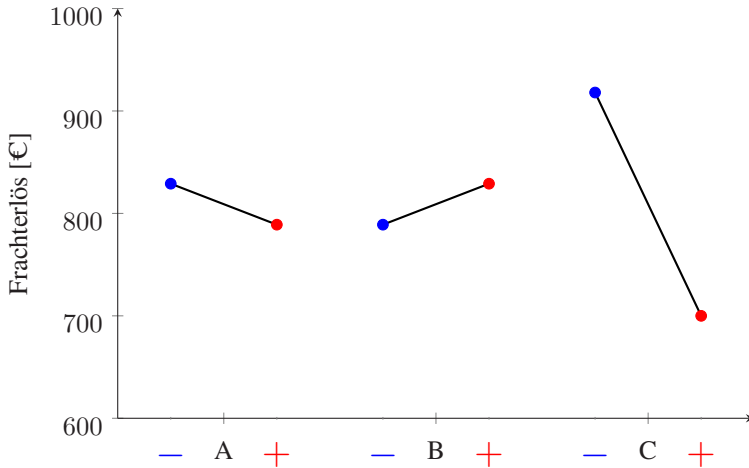


Abbildung 5.5: Frachterlös in Abhängigkeit von den Faktoren A (Entfernung), B (Geschwindigkeit) und C (Verweildauer) bei Vor- und Nachläufen

Die Tabelle 5.2 zeigt für den Dieselantrieb im Trampverkehr mit rund 21,8 Mio. Tonnen CO₂-Ausstoß den höchsten Wert. In den Berichten des Fraunhofer-Instituts ISI wird in Gnnann (2018, S 9) dieser Wert mit 19,7 Mio. Tonnen in der Größenordnung bestätigt.

Wie in Abb. 5.6 zu sehen ist, zeigen sich bei Diesel mit rund 35% bzw. 42% die größten Einsparpotentiale durch Einführung des eWay. Der Unterschied zwischen Trampverkehr und Traktionsverkehr ist für den Dieselantrieb mit unter 2% marginal, mit knapp 3% für den HVO-Dieselvekehr ebenso, wie Abb. 5.7 zeigt. Für den Batterieantrieb zeigt diese Darstellung keine Veränderung, da in beiden Verkehren nur der CO₂-Ausstoß der Trasse zu Buche schlägt und für den Stromantrieb wegen des Korrekturfaktors KF_{gs} für Grünen Strom kein Schadstoffausstoß gewertet wird. Billigt man dem Antrieb mit Batterien und mit HVO-Dieselantrieb

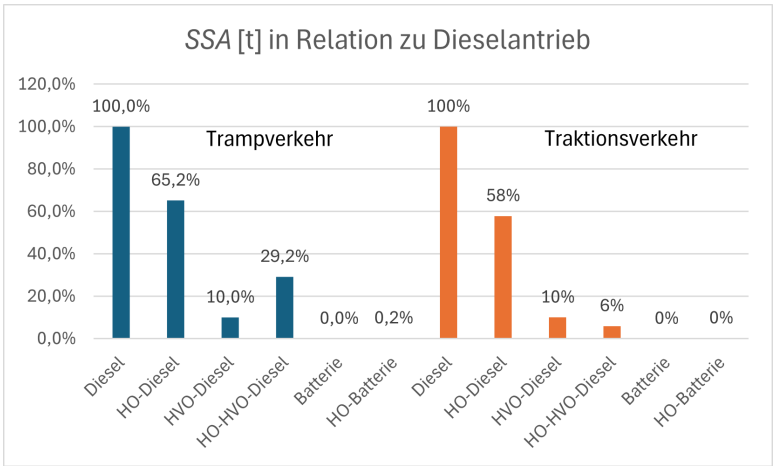


Abbildung 5.6: SSA in Relation zum Dieselantrieb

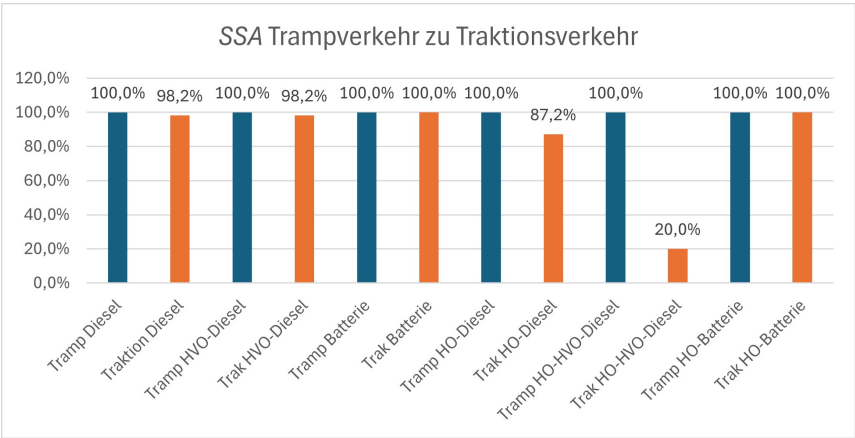


Abbildung 5.7: SSA im Vergleich von Tramp- zu Traktionsverkehr

Tabelle 5.2: SSA im Vergleich Trampverkehr zu Traktionsverkehr

Trampmodelle HO mit Maut	SSA [t]	SSA [%]
Diesel	21.814.713	100,00%
HO-Diesel	14.219.476	65,18%
HVO-Diesel	2.181.471	10,00%
HO-HVO-Diesel	6.366.179	29,18%
Batterie	0	0,00%
HO-Batterie	40.000	0,18%

Traktionsmodelle HO mit Maut	SSA [t]	SSA [%]
Diesel	21.424.780	100,00%
HO-Diesel	12.394.989	57,85%
HVO-Diesel	2.142.478	10,00%
HO-HVO-Diesel	1.275.499	5,95%
Batterie	0	0,00%
HO-Batterie	40.000	0,19%

die hohen Reduktionspotenziale zu, dann sprechen allein die Zahlen aus Abb. 5.2 nicht für den Bau von eWay-Trassen.

Die in Abb. 5.6 gezeigten Werte für den Schadstoffausstoß wurden für $FA_{ho} = 60\%$ ermittelt. Nimmt man, wie das in den Forschungsberichten für das Jahr 2030 angenommen wird, für den Anteil von HO-SZM im Trampverkehr den Wert 73%, dann bestätigen die eigenen Berechnungen mit knapp 13 Mio. Tonnen CO₂-Ausstoß das Reduktionspotential des Systems eWay in Höhe von 40%.

Die Fragestellungen aus Kapitel 1 und Abschnitt 1.2: „ob der eHighway für den Güterkraftverkehr in Deutschland einen wirksamen und bezahlbaren Beitrag zur CO₂-Reduktion leisten kann“ ist damit, was allein die CO₂-Reduktion anlangt, mit einem eindeutigen JA beantwortet.

Hinsichtlich Bezahlbarkeit folgen Aussagen in den folgenden Abschnitten.

5.4 Systemkosten

Die Systemkosten C_{sys} setzen sich zusammen aus den Anschaffungskosten CA , den Betriebskosten CB und den CO_2 -Kosten CC . Die Abb. 5.8 zeigt die Zusammensetzung der Systemkosten für unterschiedliche Zertifikatspreise und für Tramp- und Traktionsverkehr. Die Bilder sind ähnlich: Den weitaus größten Anteil nehmen mit rund 60% bis 90% die Betriebskosten ein, die CO_2 -Kosten betragen maximal rund 10% und betreffen hauptsächlich den Dieselantrieb.

Die blauen Segmente mit einer Größe von 10% bis maximal 30% stehen für die Anschaffungskosten und deren Größe ist nur bei den Batteriemodellen stark verändert. Dieses resultiert aus den derzeit noch sehr hohen Neupreisen für Batterie-SZM mit großer Reichweite und der Tatsache, dass deren Wiederverkaufswert nach abgelaufener Nutzungsdauer nicht entsprechend hoch angesetzt worden ist, da ein Markt für solche Gebrauchtfahrzeuge noch nicht existiert.

Da Personalkosten und Reparaturkosten in den verschiedenen Modellen nahezu unverändert sind und andere Anteile wie Steuer- und Versicherungskosten komplett identisch sind, bleiben die Treibstoff- und die Mautkosten ausschlaggebend für die Höhe von Veränderungen bei den Betriebs- und Systemkosten. Deren Höhe wird in den folgenden Abschnitten untersucht.

5.4.1 Einfluss der CO_2 -Zertifikate

Der Preis PC_{zert} der CO_2 -Zertifikate geht bei der Ermittlung der CO_2 -Kosten in die Formel 4.17 ein und hat Einfluss auf die Systemkosten C_{sys} .

Da der in dieser Formel geführte Schadstoffausstoß für Stromantrieb mit dem Faktor KF_{gs} zu 100% und im Falle des HVO100-Diesel zu 90% eliminiert wird, fließt in den Modellen mit eWays nur der CO_2 -Ausstoß der Trasse in die Systemkosten

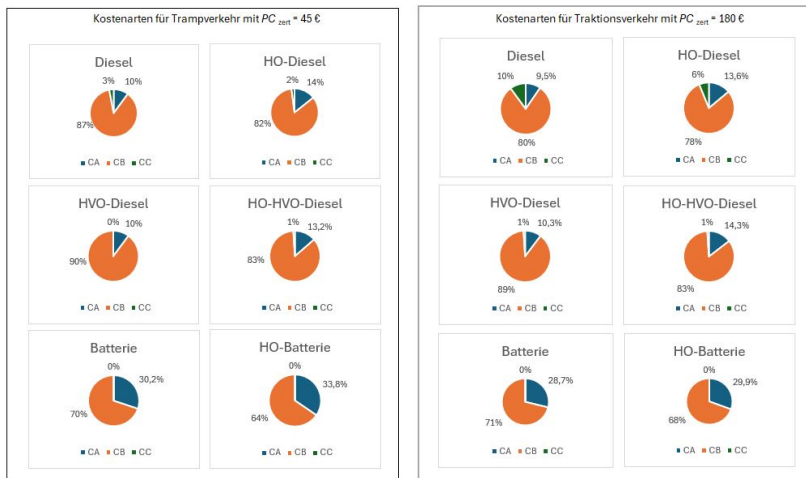
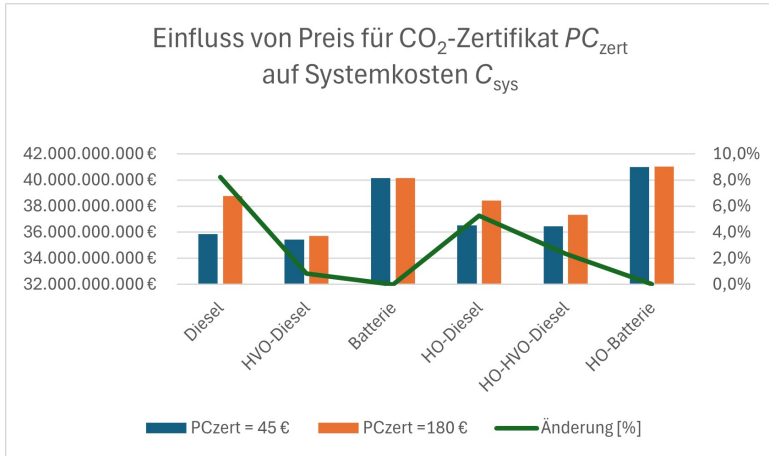


Abbildung 5.8: Aufteilung der Systemkosten C_{sys}

ein. Auf eine Nutzungsdauer von 15 Jahren bezogen, ist dieser in den Jahreskosten mit 10 t pro Kilometer HO-Strecke annähernd zu vernachlässigen. Die Abbildung 5.9 zeigt als Beispiel für das Modell Trampverkehr mit HO-Maut, dass der Preis des CO_2 -Zertifikats dort einen großen Einfluss hat, wo der Schadstoffausstoß aus dem Antrieb groß ist. Dieses gilt vor allem beim reinen Dieselantrieb, etwas weniger beim HO-Dieselantrieb, wegen des Stromantriebs unter der Oberleitung. Beim reinen Batterieantrieb spielt der Zertifikatspreis keine Rolle, beim HO-Batterieantrieb in nur sehr geringem Maße, da dort der Schadstoffausstoß der Trasse einfließt.

Das Brennstoffemissionshandelsgesetz BEHG Bundesministerium der Justiz (2019) legt in § 10 für den Emissionshandel 45 € für 2024, 55 € für 2025 und maximal 65 € für 2026 je Tonne CO_2 fest. Die in dieser Arbeit verwendeten Werte für PC_{zert} werden von 45 € bis 180 €/t variiert und decken die erwarteten Preissteigerungen der nächsten Jahre. In den untersuchten Literaturquellen werden teilweise noch höhere Werte angesetzt, in Bachmann und Bayer (2023, S 1) zum Beispiel 250 €.

Abbildung 5.9: Einfluss von PC_{zert} auf C_{sys}

Steigende Werte für PC_{zert} zeigen in Tabelle 5.1 mit Ausnahme beim reinen Batterieantrieb steigende Systemkosten. Die Zahlen aus Tabelle 5.1 lassen sich, wie in Abb. 5.10 dargestellt, aber auch anders interpretieren: Setzt man die Systemkosten für das Dieselmotormodell auf 100% und vergleicht man die Werte der anderen Antriebe damit, dann sinkt mit steigendem Preis des CO₂-Zertifikats deren relativer Anteil.

5.4.2 Einfluss der LKW-Maut

Beckers et al. (2019) beschreiben ein Förderregime für die Einführung des HO-Systems und nennen dabei

Zuschüsse bei Ankauf der HO-SZM

Kfz-Steuer für HO-SZM

LKW-Maut für HO-SZM

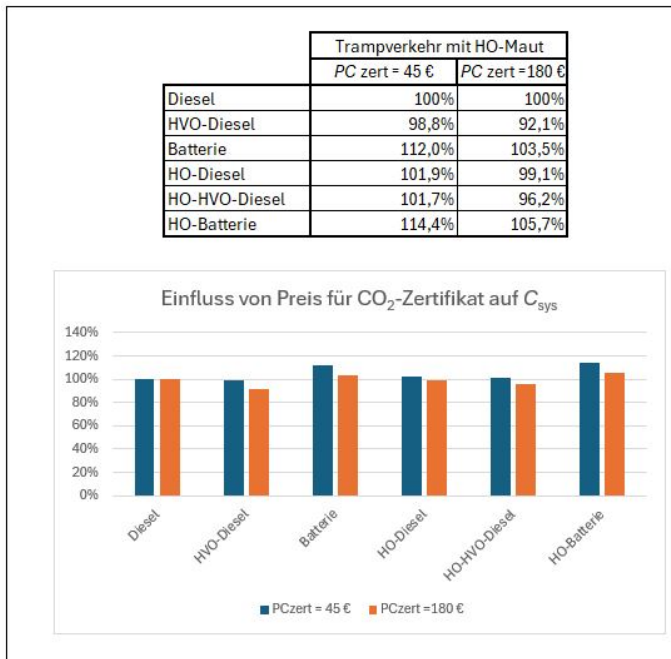


Abbildung 5.10: Relative Beziehungen der Systemkosten C_{sys} in Abhängigkeit vom Preis der CO₂-Zertifikate PC_{zert}

als Möglichkeiten, die Einführung des HO-Systems zumindest in bestimmten Zeiträumen zu unterstützen.

Die Übernahme der Mehrkosten beim LKW-Kauf bis zur Höhe von 80% durch den Staat gab es bereits, lief aber mit Hinweis auf die Zwänge der Gestaltung eines Staatshaushalts unter Einhaltung der Schuldengrenze im November 2023 aus, wie auch die Förderung des Kaufs von E-PKW. Im September 2024 kündigt die deutsche Regierung vor dem Hintergrund nachlassender PKW-Verkäufe, vor allem von PKW mit E-Antrieb, erneut an, eine Förderung einzuführen. Ob diese auch für LKW mit E-Antrieb gelten wird, ist noch nicht bekannt.

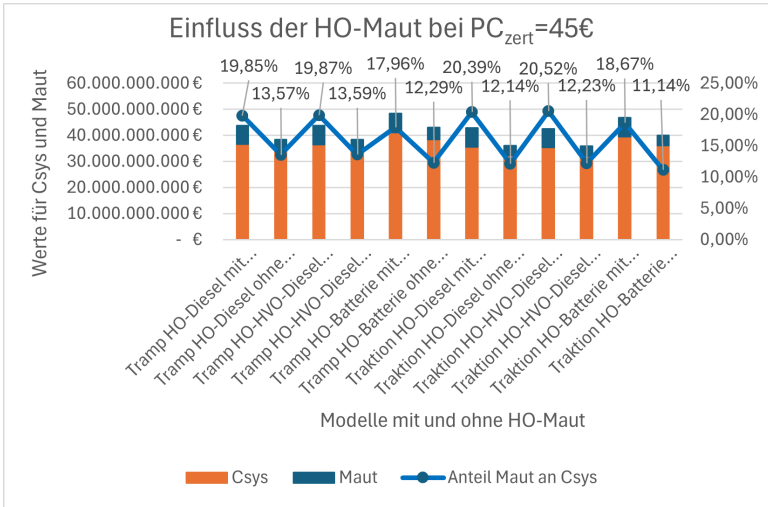
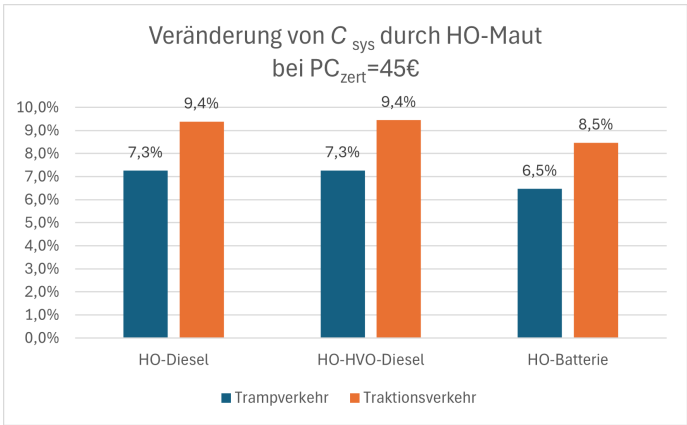


Abbildung 5.11: Einfluss der HO-Maut auf die Systemkosten C_{sys}

Einer ermäßigten Kfz-Steuer für HO-SZM oder deren kompletter Wegfall kann mit einem Betrag von etwa 600 € pro Jahr sicher keine Lenkungswirkung zugesprochen werden. Mit der Ausgestaltung der Maut für HO-SZM und speziell für



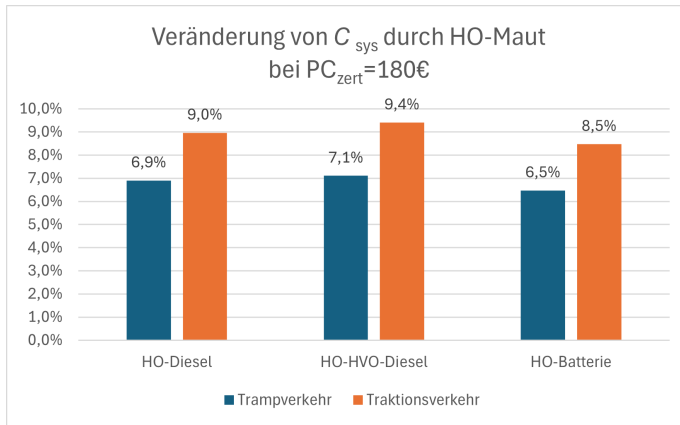


Abbildung 5.12: Einfluss der HO-Maut auf die Systemkosten C_{sys}

deren Fahrtstrecke unter der Oberleitung ist aber ein Instrument mit erheblichem Einfluss vorhanden: Seit der Mauterhöhung ab 01.12.2023 nehmen die Mautkosten für die schweren Lastzüge einen Anteil von rund 20% an den Gesamtkosten ein. Fahren die HO-SZM gemäß FN_{ho} zu 60% unter einer Oberleitung, dann machen die dafür anfallenden Mautkosten einen Anteil von zwischen 11% und 13% der Systemkosten aus. Dieses zeigt Abb. 5.11 für alle untersuchten Modelle. Die eigenen Berechnungen ergaben für einen Zertifikatspreis von 45 € eine Veränderung der Systemkosten C_{sys} von zwischen 7,3% und 9,4% durch die Maut auf HO-Strecken. Für einen Zertifikatspreis von PC_{zert} in Höhe von 180 € zeigen sich sehr ähnliche Werte, wie die Abb. 5.12 zeigt.

Für Fuhrparkbetreiber ist der Blick auf die Betriebskosten CB bedeutender: Fährt ein HO-SZM 60% seiner jährlichen Laufleistung in Höhe von 120.000 km unter der Oberleitung, wie in Wietschel, Gnann et al. (2017, S. 4) für das Kernnetz angenommen, und wäre diese Strecke mautbefreit, dann wäre das ein Kostenwegfall von rund 25 Tsd. € jährlich. Durch den Stromantrieb würden gegenüber dem Dieselantrieb ungefähr weitere 25 Tsd. € wegfallen, sodass bei einer Nutzungsdauer von vier Jahren die Mehrkosten bei der Anschaffung in Höhe von gegenwärtig noch rund 200 Tsd. € ausgeglichen wären. Die prognostizierten Minderkosten

bei Reparatur und Wartung müssten in diese Rechnung nicht einmal einbezogen werden. Eine Mautbefreiung für HO-SZM, komplett, teilweise oder temporär bedeutet allerdings in gleicher Höhe eine Belastung für die Volkswirtschaft. In Hacker, Jöhrens et al. (2020, S 5) wird davon ausgegangen, dass bereits eine nur teilweise Heranziehung von Einnahmen aus der LKW-Maut langfristig ausreichen würde, die Infrastruktur des HO-Systems zu bauen und zu unterhalten.

5.4.3 Einfluss des HO-Systems

Bei allen Modellen mit HO-Betrieb fließen für den Bau und den Unterhalt des eWay erhebliche Beträge in die Systemkosten ein, in geringerem Maße auch durch die CO₂-Kosten der Trasse in Abhängigkeit von der Höhe des CO₂-Zertifikats PC_{zert} . Diesen Mehrkosten stehen erwartete Minderkosten beim Betrieb von HO-SZM gegenüber, die abhängig sind von der Nutzerzahl des HO-Systems. In Gnann, Wietschel, Plötz et al. (2017) zeigen die Forscher des Fraunhoferinstituts in einem Vortrag zum Finanzierungsbedarf, dass im eingeschwungenen Zustand die Einsparungen die Mehrkosten kompensieren können und das System über Mautentnahmen durch die Nutzer finanziert werden kann.

Die Anzahl der in HO-Modellen laufenden HO-SZM wird über den Faktor FA_{ho} bestimmt. In Wietschel, Gnann et al. (2017) wird er für das Jahr 2030 mit 73% angenommen. Die eigenen Berechnungen erfolgten für den Bereich von 40% bis 100%.

Diese Arbeit betrachtet ausschließlich die Fahrzeugklasse der SZM mit einem zGG von 26 bis 40 Tonnen. Wegen des Nutzlastverlustes bei den HO-SZM wird die Gesamtanzahl der im HO-System laufenden LKW größer werden. Dieser Effekt soll wegen leichter Komponenten, vor allem bei den Batterien, zunehmend kleiner werden, bis er laut Wietschel, Gnann et al. (2017, S 106) gegen 2030 ganz verschwindet. Bis dahin wird mit größer werdender Anzahl von Fahrzeugen auch die Anzahl der eingesetzten Fahrer steigen. Zusätzlich fließen die Kosten der Elektrotrasse in die Systemkosten ein, sodass während der Einführungsphase mit nur wenigen Teilnehmern am HO-System mit steigenden Systemkosten zu rechnen

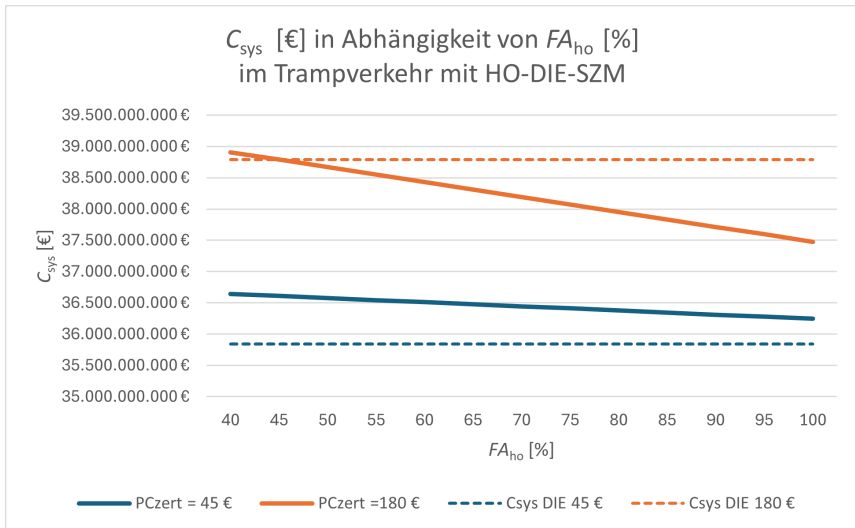


Abbildung 5.13: Einfluss von FA_{ho} auf C_{sys} im HO-System

ist. Mit steigender Anzahl von HO-SZM sollten diesen Mehrkosten zunehmend Minderkosten aus den günstigeren Bedingungen des E-Antriebs gegenüberstehen. Steigende Preise für die CO₂-Zertifikate würden die Differenzen ebenfalls vermindern. Deren Einfluss zeigt auch die Abb. 5.13, wo es um die Änderung der Systemkosten geht, wenn im Trampverkehr das Modell HO-Dieselantrieb den reinen Dieselantrieb ersetzt und das Kernnetz mit 4.000 km Elektrostrecke ausgebaut ist. Die gestrichelten Linien im Diagramm stellen die Systemkosten für beide Zertifikatspreise im reinen Dieselbetrieb dar, und diese verlaufen im Diagramm waagrecht, da es keine Abhängigkeit von FA_{ho} und von FN_{ho} gibt.

Steigende Zahlen von FA_{ho} bedeuten sinkende Systemkosten. Solange der Zertifikatspreis bei 45 € bleibt, sind die Systemkosten im HO-Betrieb dennoch höher. Bei einem Zertifikatspreis von 180 € wird bereits bei einem Anteil von 45% HO-SZM Kostengleichheit erreicht, und bei den prognostizierten 73% stellt sich ein kleiner Kostenvorteil von 1,7% ein, bei einer Reduzierung des CO₂-Ausstoßes von 42%.

Den Werten für die Abb. 5.13 liegt die Annahme zugrunde, dass auch bei einem Anteil von nur 40% HO-Fahrzeugen bereits 4.000 km HO-Netz ausgebaut sind. Mit Bezug auf das Chicken-and-Egg-Problem kann diese Annahme zutreffen, denn ohne dichtes HO-Netz werden die Transporteure keine HO-SZM kaufen.

Tabelle 5.3: Veränderungen von C_{sys} und SSA beim Markthochlauf

			Veränderungen bei HO-Netzausbau		
Varianten			C_{sys}	C_{sys}	SSA
HO-Netz [km]	FA_{ho}	FN_{ho}	für $PC_{\text{zert}} = 45\text{€}$	für $PC_{\text{zert}} = 180\text{€}$	unabhängig von PC_{zert}
4.000	73,0%	60,0%	Basis 100%	Basis 100%	Basis 100%
3.500	61,5%	58,0%	99,9%	100,7%	87,8%
3.000	50,0%	55,0%	99,8%	101,4%	78,3%
2.500	40,0%	50,0%	99,7%	102,1%	71,2%
2.000	30,0%	44,0%	99,7%	102,6%	65,8%
1.500	20,0%	35,0%	99,9%	102,9%	61,5%
1.000	10,0%	21,0%	100,3%	102,9%	58,6%

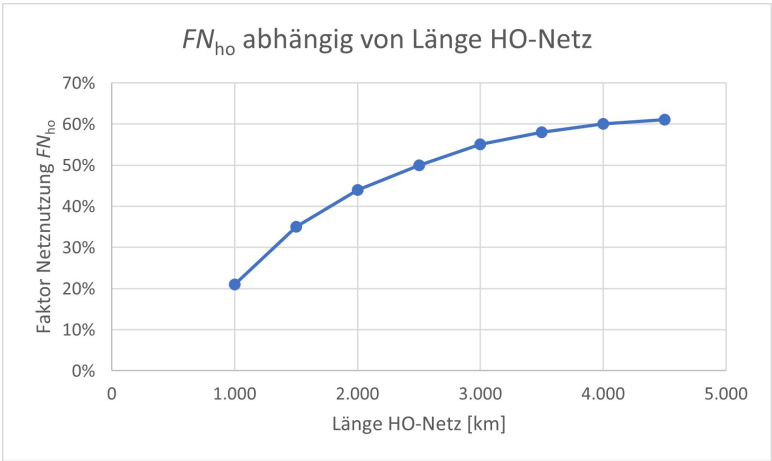


Abbildung 5.14: Veränderungen von FN_{ho} beim Markthochlauf

Mögliche Verhältnisse während des Markthochlaufs mit unterschiedlich langen HO-Netzen werden in Tabelle 5.3 dargestellt. Als Basis dient der eingeschwungene

Zustand auf dem Kernnetz: Die HO-Strecke ist 4.000 km lang, FA_{ho} beträgt 73% und FN_{ho} beträgt 60%. Diesem Zustand sprechen die Forschungsberichte und die eigenen Berechnungen eine CO_2 -Reduktion von ungefähr 40% zu. Die niedrigste Ausbaustufe wird, wie in Abschnitt 2.12 dargestellt, mit 1.000 km Netzlänge und mit $FN_{ho} = 21\%$ angesetzt. Es kann ein Verlauf angenommen werden, wie in Abb. 5.14 dargestellt. Die Werte für FA_{ho} wurden linear verteilt. Für $PC_{zert} = 45$ € sind die Systemkosten über den gesamten Verlauf annähernd unverändert. Bei $PC_{zert} = 180$ € sinken sie mit zunehmendem Netzausbau leicht. Die Reduzierungen beim Schadstoffausstoß treten beim skizzierten Markthochlauf von Anfang an ein. Bereits die erste Ausbaustufe bringt annähernd 60% der im eingeschwungenen Zustand erreichbaren CO_2 -Reduktionen. Die relativen Reduzierungen lassen mit dem weiteren Ausbau nach. Die Gründe wurden in Kapitel 2.5 genannt und liegen im Ausbau immer weniger befahrener Strecken.

Das Effektdiagramm 5.15 zeigt bei $PC_{zert} = 45$ € für steigende FA_{ho} auch steigende Systemkosten und erst für einen Zertifikatspreis von 180 € ändert sich das. Der Grund liegt in den niedrigeren Werten für FA_{ho} . Während das Diagramm 5.13 den Bereich ab $FA_{ho} = 40\%$ zeigt, schwankt im Effektdiagramm der Wert für FA_{ho} um 50% nach oben und unten um den Mittelwert 30%. In diesem Bereich kommt die Wirkung des HO-Systems noch nicht zur Geltung, insbesondere bei niedrigem PC_{zert} . Die Senkung des CO_2 -Ausstoßes setzt dagegen sofort ein, wie das Diagramm 5.16 zeigt.

Die Wirkung des HO-Systems wird außerdem bestimmt vom Grad der Nutzung der HO-Strecken FN_{ho} durch die HO-SZM. Die Abb. 5.17 zeigt für konstantes FA_{ho} von 60% die Systemkosten C_{sys} in Abhängigkeit von FN_{ho} für zwei unterschiedliche Zertifikatspreise. Wie in Abb. 5.13 zeigen die gestrichelten Linien den dieses Mal von FN_{ho} unabhängigen Verlauf von C_{sys} im reinen Dieselbetrieb. Beide Referenzlinien werden geschnitten, für $PC_{zert} = 180$ € bereits bei 55% Nutzungsanteil. Für $PC_{zert} = 45$ € liegt der Schnittpunkt mit 75% sehr nahe bei dem Wert, der in Wietschel, Gnann et al. (2017) für das Jahr 2030 mit 73% in die Berechnungen eingestellt worden ist.

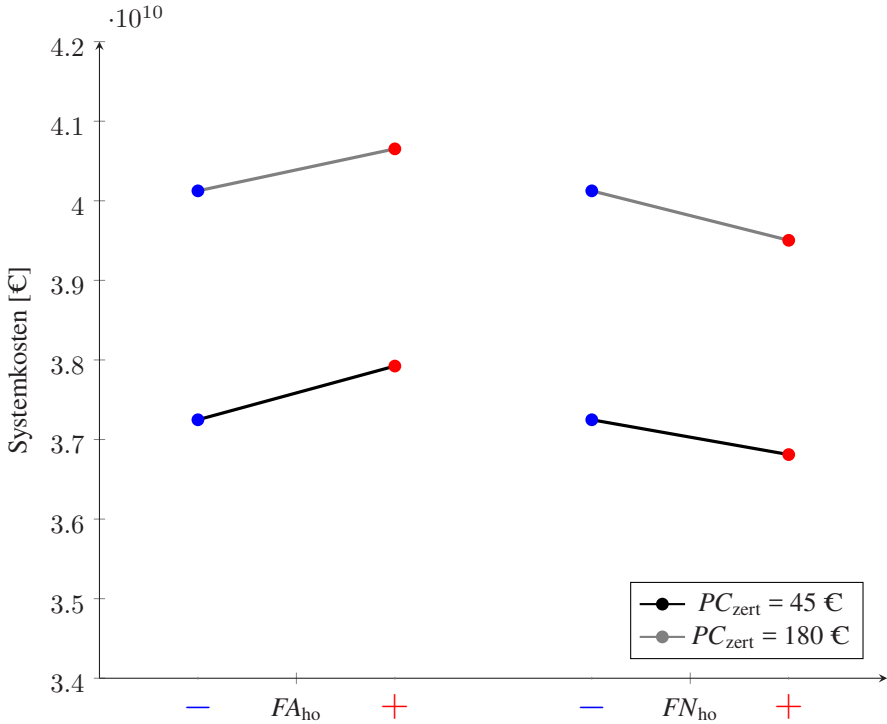


Abbildung 5.15: Einfluss von FA_{ho} und FN_{ho} auf die Systemkosten C_{sys} für unterschiedliche CO_2 -Zertifikatspreise PC_{zert}

Modelle mit HVO-Diesel-Antrieb und mit Batterie-Antrieb haben im Falle des Batterieantriebs keinen CO_2 -Ausstoß, im Falle des HVO-Antriebs einen um 90% reduzierten Ausstoß gegenüber dem Referenzantrieb Diesel. Mit Einführung des HO-Systems kommen in beiden Fällen Kosten wegen Bau und Unterhalt des eWays hinzu, sowie die daraus resultierenden, wenn auch geringen, CO_2 -Kosten.

5.4.4 Einfluss von Traktionsverkehr

Es wird untersucht, ob die Einbindung von Traktionsverkehren bei Abwicklung der 183.000 Touren im System eine Änderung beim Schadstoffausstoß SSA und

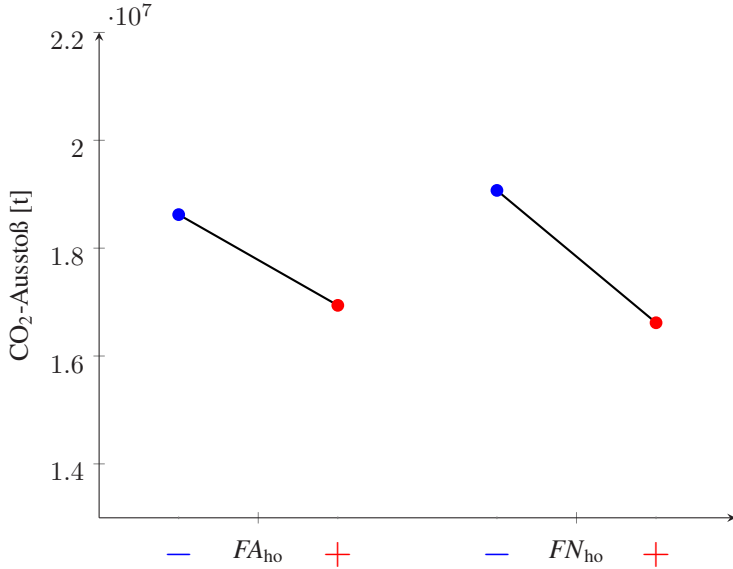


Abbildung 5.16: Einfluss von FA_{ho} und FN_{ho} auf CO_2 -Ausstoß

bei den Systemkosten CS_{sys} bewirkt. Der Faktor FA_{trak} bestimmt die Anzahl von SZM, die im jeweiligen Modell im Traktionsverkehr unterwegs ist. Die Anteile der im Trampverkehr abgewickelten Touren errechnet sich mit der Formel

$$FA_{tramp} = FA_{sys} - FA_{trak} \quad (5.1)$$

Für die Zahl der eingesetzten Fahrzeuge gilt, wie in Kapitel 4 hergeleitet:

$$ZF_{tramp} = ZF_{sys} * FA_{tramp}$$

und

$$ZF_{trak} = ZF_{sys} * FA_{trak}$$

Die Berechnungen werden mit $FA_{ho} = 0$ zunächst ohne Einbeziehung des HO-Betriebs durchgeführt. Die Kosten für Umschlagplätze und die Buchungsgebühren wurden berücksichtigt. Die Ergebnisse sind in Abb. 5.18 und Abb. 5.19 für den

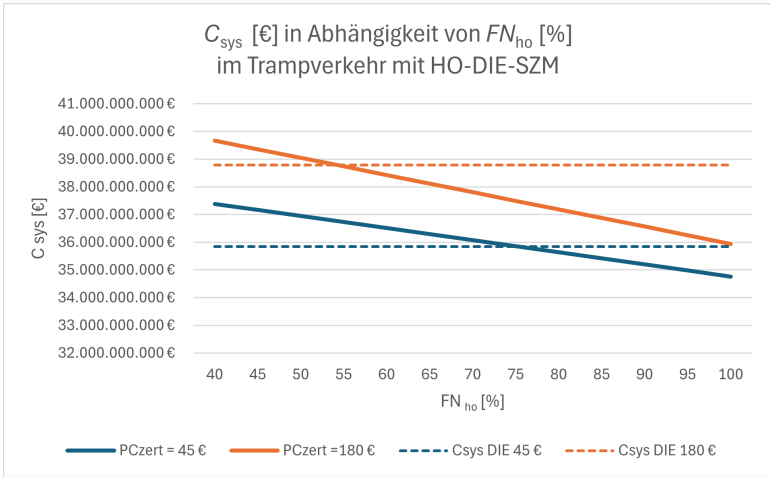


Abbildung 5.17: Einfluss von FN_{ho} auf C_{sys} im HO-System

Zertifikatspreis $PC_{zert} = 45$ € dargestellt, wobei sich für $PC_{zert} = 180$ € kein anderes Bild zeigt: Die Veränderungen bei SSA und bei C_{sys} sind marginal.

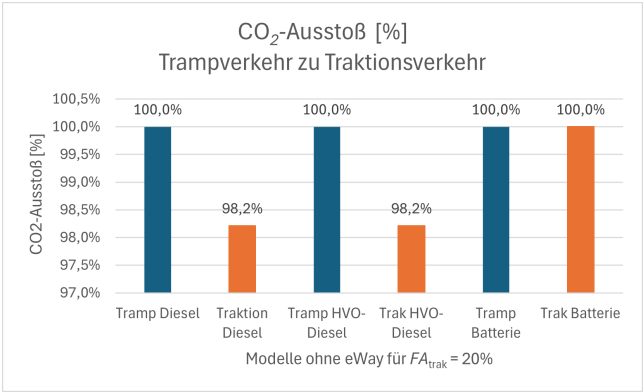


Abbildung 5.18: CO_2 -Ausstoß bei Tramp- und Traktionsverkehr ohne eWay

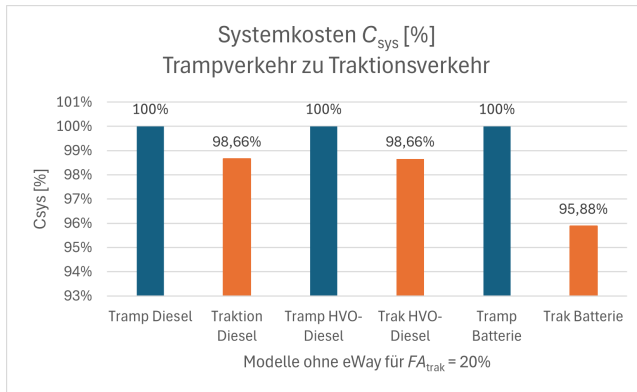


Abbildung 5.19: C_{sys} bei Tramp- und Traktionsverkehr ohne eWay

Es wird nun untersucht, ob die Einbeziehung des eWay Veränderungen bewirkt. Abb. 5.20 und Abb. 5.21 zeigen für ansonsten gleiche Parameter die Ergebnisse, wenn der Traktionsverkehr über den eWay laufen kann. Nun sinkt der CO_2 -Ausstoß auch bei Diesel- und bei HVO-Dieselantrieb deutlich. Die Systemkosten sinken bei allen Antrieben, allerdings immer noch im Bereich von unter 5%.

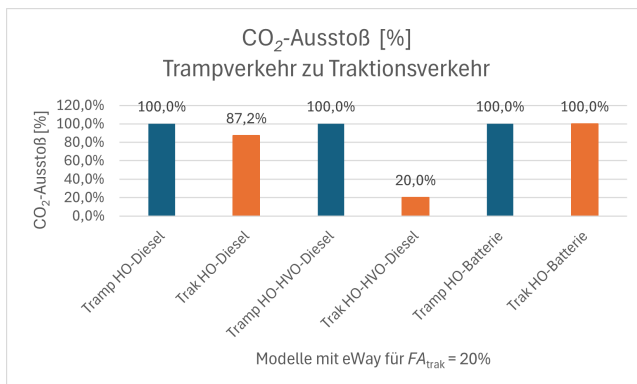


Abbildung 5.20: CO_2 -Ausstoß bei Tramp- und Traktionsverkehr mit eWay

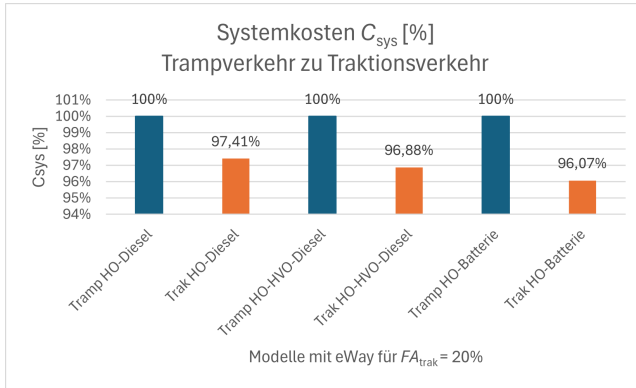


Abbildung 5.21: C_{sys} bei Tramp- und Traktionsverkehr mit eWay

Nachdem in Abb. 5.20 und Abb. 5.21 für gleichbleibenden Faktor FA_{trak} dargestellt worden ist, dass Traktion über einen eWay bei allen Modellen Vorteile bringen kann, wird in Abb. 5.22 und Abb. 5.23 gezeigt, wie sich dessen Veränderungen auswirken.

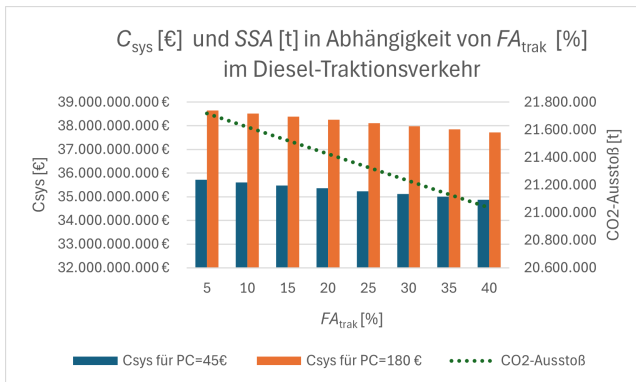


Abbildung 5.22: Einfluss von FA_{trak} im Traktionsverkehr ohne eWay

Für den reinen Dieselantrieb zeigen sich zwischen $FA_{trak} = 5\%$ und 20% die zuvor schon ermittelten marginalen Unterschiede. Geht man bis $FA_{trak} = 40\%$, dann

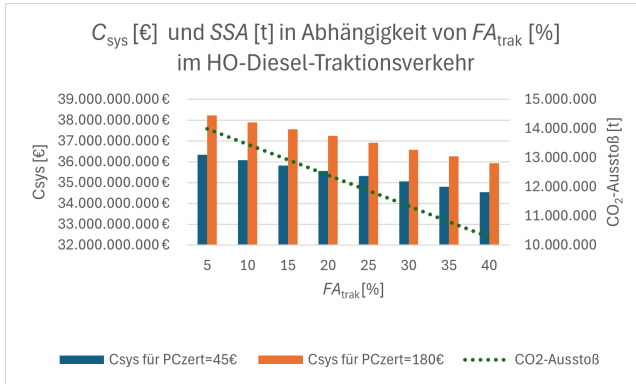


Abbildung 5.23: Einfluss von FA_{trak} im Traktionsverkehr mit eWay

vergrößern sich die Unterschiede auf immer noch nur rund 2,5%. Für den HO-Dieselantrieb über den eWay sind die Reduzierungen bei den Systemkosten bei rund 5% und die Reduktion beim CO_2 -Ausstoß sogar bei 25%. Tatsächlich wurde wegen der besseren Darstellung die Größe von FA_{trak} bis 40% ausgewertet. Nach den Ausführungen im Abschnitt 3.2 wird dieser Wert, bezogen auf die 183.000 SZM im System, aber nicht erreicht werden.

In einem weiteren Schritt wird für $FA_{\text{trak}} = 20\%$ die Anzahl der Teilnehmer am HO-Verkehr über FA_{ho} variiert. Die Abb. 5.24 zeigt die Werte, beginnend mit dem Einführungszustand und einem Anteil HO-SZM von nur 10% bis hin zum eingeschwungenen Zustand $FA_{\text{ho}} = 73\%$ im Jahr 2030. Der Schadstoffausstoß wird um rund 36% sinken, die Systemkosten bei $PC_{\text{zert}} = 45 \text{ €}$ nur knapp 1%, bei $PC_{\text{zert}} = 180 \text{ €}$ knapp 3%. Diese Werte bestätigen, dass auch im Traktionsmodell die Einführung des HO-Systems zwar Reduktionen des CO_2 -Ausstoßes bis 40% bewirken kann, dass aber die Systemkosten bei wachsender Teilnehmerzahl am HO-Verkehr nur dann merklich sinken, wenn der CO_2 -Ausstoß mit hohen Gebühren belegt wird. Zu überprüfen bleibt nun, welche Veränderungen sich durch Variation von FN_{ho} ergeben. Die Abb. 5.25 zeigt beim CO_2 -Ausstoß mit knapp 39% eine leicht höhere Reduktion und auch die Systemkosten sinken mit knapp 6% bzw. knapp 8% etwas stärker als durch die Veränderung bei FA_{ho} zuvor dargestellt.

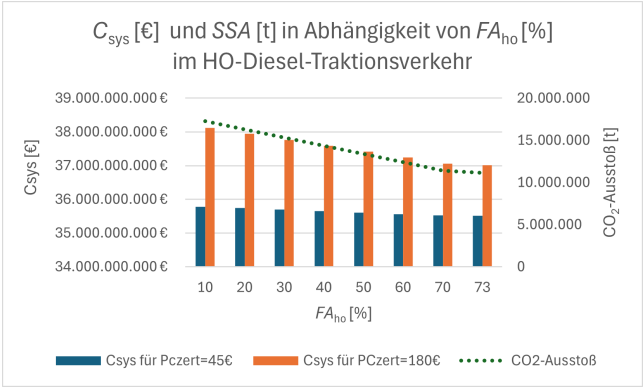


Abbildung 5.24: Einfluss von Faktor FA_{ho} im Traktionsverkehr auf eWays

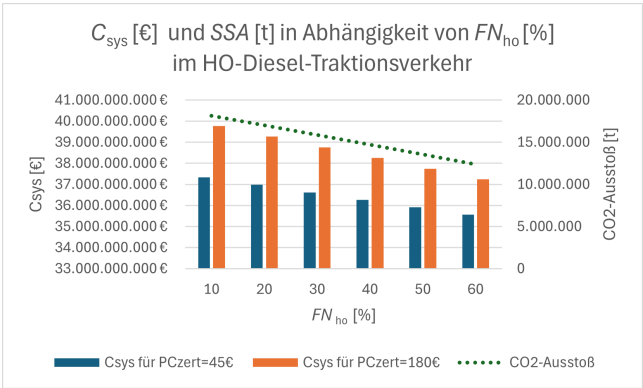


Abbildung 5.25: Einfluss von Faktor FN_{ho} im Traktionsverkehr auf eWays

Die Effektdiagramme 5.26 und 5.27 beziehen sich auf ein Modell, in dem Tramp- und Traktionsfahrzeuge mit unterschiedlichen SZM und unterschiedlichen Treibstoffen fahren: Die HO-Tramp-SZM fahren mit Strom auf dem eWay und außerhalb mit fossilem Diesel. Die Tramp-SZM fahren durchweg mit fossilem Diesel. Die Traktions-SZM fahren auf der Traktionsstrecke mit Strom aus der Oberleitung und mit Strom aus der Batterie, wenn sie zwischen eWay und Umschlagpunkt fahren. Die Traktions-SZM im Nahverkehr fahren ausschließlich mit fossilem Diesel. Für alle SZM wurden unterschiedliche Kaufpreise angesetzt. Wiederverkaufswerte und Nutzungsdauern wurden angepasst, ebenso die Faktoren für Reparaturen.

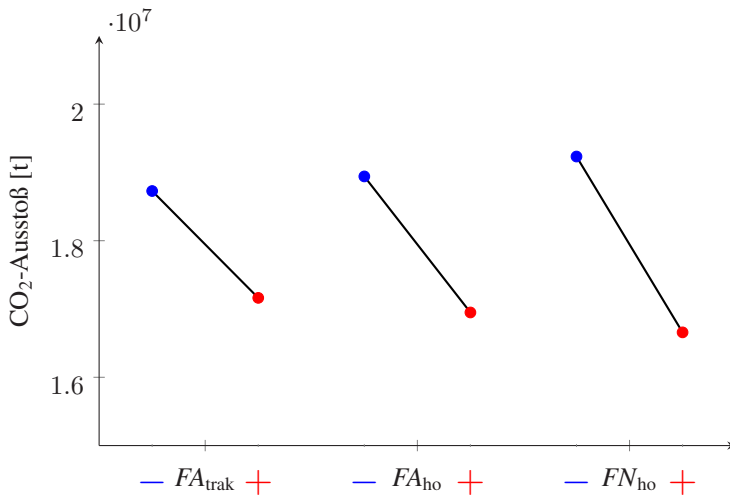


Abbildung 5.26: Effekt-Diagramm für CO₂-Ausstoß

Die Einflussfaktoren variieren um jeweils 50% um ihre folgenden Mittelwerte:

- $FA_{\text{trak}} = 10\%$
- $FA_{\text{ho}} = 30\%$
- $FN_{\text{ho}} = 20\%$

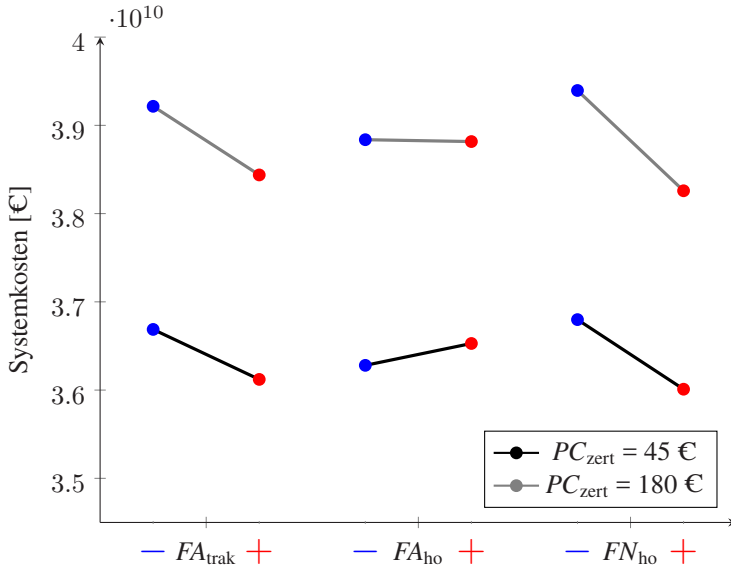


Abbildung 5.27: Effektdiagramm für Systemkosten C_{sys} bei unterschiedlichen PC_{zert}

Die Bandbreite wurde bewusst so groß gewählt, um die Tendenz der Veränderungen zu verdeutlichen.

Der Schadstoffausstoß sinkt jeweils und am stärksten durch Veränderung von FN_{ho} . Bei den Systemkosten zeigt sich das bekannte Bild: Traktion bewirkt fallende Kosten, und niedrige Werte von FA_{ho} bei niedrigem PC_{zert} bewirken höhere Systemkosten.

5.4.5 Einfluss der Treibstoffkosten und Anschaffungspreise

Die Zentrale der Straßenverkehrsgenossenschaft in Frankfurt legt ihren Mitgliedern Unterlagen zur Fahrzeugkalkulation vor (siehe Anlage A.5) und weist den Anteil der Dieselskosten aus. Für Fernverkehrseinsatz wurden 20,1% für das Jahr

2003 angegeben. Der BGL Bundesverband Güterverkehr Logistik und Entsorgung eV. (2017) gibt 25,7% für das Jahr 2015 an, was eine relative Erhöhung des Treibstoffkostenanteils von fast 28% bedeutet. Wie sich der Dieselpreis in diesem Zeitraum entwickelt hat, zeigt ein Blick auf die im Internet veröffentlichten Tabellen des ADAC (www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/deutschland/), wo für das Jahr 2003 ein Durchschnittspreis von 0,884 € ausgegeben wird und für 2015 ein Preis von 1,169 € je Liter. Der Dieselpreis ist im selben Zeitraum demnach um 32% gestiegen. Effizientere Dieselmotoren, bessere Aerodynamik der Lastzüge und geschulte Fahrer können den Einfluss steigender Dieselpreise also zumindest abschwächen.

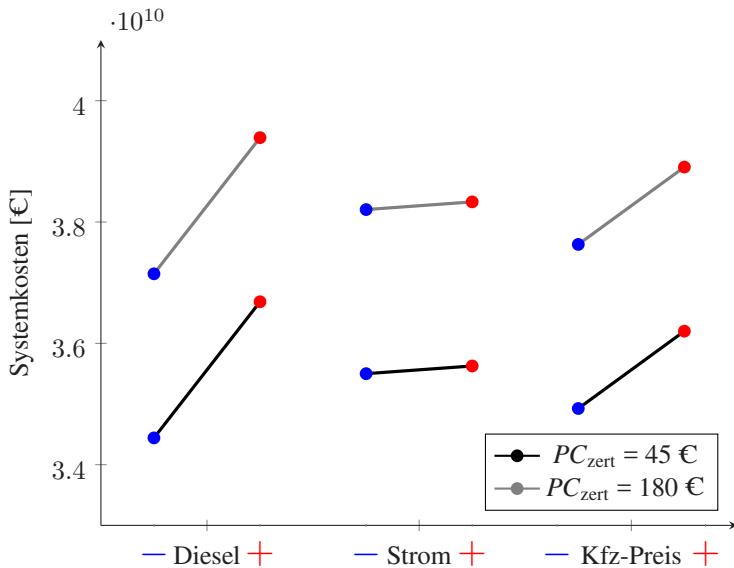


Abbildung 5.28: Effektdiagramm für Systemkosten C_{sys} bei Änderung der Einstandspreise für Diesel, Strom und SZM

Die Abb. 5.28 unterstreicht die Bedeutung dieser Erkenntnis: Wenn bei Beibehaltung aller übrigen Parameter die Preise für Diesel, HVO-Diesel, Strom und für die Anschaffung der Fahrzeuge um 50% um einen als realistisch angenommenen Wert

schwanken, dann zeigt das Effektdiagramm für die Änderung des Dieselpreises eine annähernd doppelt große Wirkung, als bei gleicher prozentualer Änderung der Anschaffungspreise für die Fahrzeuge. Das gilt unabhängig von der Höhe der Preise für die CO₂-Zertifikate. Den geringsten Einfluss haben Änderungen des Strompreises. Änderungen von 50% sind, obwohl unwahrscheinlich, deshalb gewählt worden, um die Tendenz besser verdeutlichen zu können.

Die in Abb. 5.28 dargestellten Effekte beziehen sich auf ein Modell, in dem in Hub-, Tramp- und Traktionsverkehren unterschiedliche SZM mit unterschiedlichen Treibstoffen fahren: Die Hub-SZM fahren mit Strom auf den eWay und mit HVO100-Diesel außerhalb. Die Tramp-SZM fahren mit Strom auf den eWay und mit fossilem Diesel außerhalb. Die Traktions-SZM auf der Traktionsstrecke fahren mit Strom auf dem eWay und mit Strom aus der Batterie, wenn sie zwischen eWay und Umschlagpunkt fahren. Die Traktions-SZM im Nahverkehr fahren ausschließlich mit Strom aus den Batterien. Für alle SZM wurden unterschiedliche Kaufpreise angesetzt. Wiederverkaufswerte und Nutzungsdauern wurden teilweise variiert, ebenso die Faktoren für Reparaturen.

5.5 Hub-Verkehr

Es soll überprüft werden, ob für die im Abschnitt 3.4.1 beschriebenen Transporte bei Abwicklung über die zwei bereits beschriebenen Hub-Netze eine CO₂-Reduktion nachgewiesen werden kann und welche Änderung der Systemkosten damit verbunden ist. Dazu muss die Anzahl von Fahrzeugen im System ermittelt werden, sowie die Fahrtstrecke zwischen Depot und Hub. Die Bitte an die sieben untersuchten Netzwerke, hierzu Daten zur Verfügung zu stellen, wurde überwiegend negativ beantwortet. Es war aber zu erfahren, dass von einigen Depots nicht nur ein, sondern sogar zwei LKW täglich ankommen und zumindest an einem Hub mehr als 100 pro Nacht. Soweit die Depotlisten auf unsere Anfrage hin nicht veröffentlicht wurden, ließen sich diese aus den Internetauftritten der Netzwerke ablesen und deren mittlere Anzahl im Sommer 2022 auf 84 ermitteln.

Tabelle 5.4: Elektro-Fahrtanteil bei unterschiedlicher Länge des eWay

Werte für das kleine Hub-Netz	Gesamt	elektrisch
SZM im System [Anzahl]	1.100	1.100
Depotentfernung [km]	294	62
Arbeitstage [Anzahl]	240	240
Faktor Hin- und Rückfahrt	2	2
jährliche Laufleistungen [km]	155.232.000	32.736.000
Fahrtanteil auf dem eWay		21%
Länge des eWay [km]	0	260

Werte für das große Hub-Netz	Gesamt	elektrisch
SZM im System [Anzahl]	1.100	1.100
Depotentfernung [km]	294	88
Arbeitstage [Anzahl]	240	240
Faktor Hin- und Rückfahrt	2	2
jährliche Laufleistungen [km]	155.232.000	46.464.000
Fahrtanteil auf dem eWay		30%
Länge des eWay [km]	0	432

Geht man davon aus, dass von diesen 84 Depots an jedem der in Abbildung 3.16 gezeigten Hubs 75 Fahrzeuge ankommen, bei ELVIS sollen das nach eigenen Angaben über 100 sein, so kann mit arbeitstäglich 1.100 LKW im System gerechnet werden. Mit den Zahlen aus den Tabellen 5.4 ließen sich analog den vorausgegangenen Berechnungen für andere Modelle die Veränderungen bei CO₂-Ausstoß und Systemkosten berechnen. Zusätzlich konnte ermittelt werden, mit welchen Kostensteigerungen die Erhöhung des elektrischen Fahrtanteils von 21% im kleinen Netz auf 30% im großen Netz verbunden ist.

Da beide Hub-Netze spätestens in der Ausbaustufe 4 Bestandteil des in Abb. 2.13 gezeigten 4.000 km langen Kernnetzes sein werden, die Baukosten also nur einmal anfallen, weist die Tabelle 5.5 die eWay-Kosten separat aus. Für beide Netze zeigen sich zwar CO₂-Reduktionen von 18% und 24%, aber auch Steigerungen der Systemkosten von 4,7% bzw. 2,7% bei Abwicklung über das HO-System.

Tabelle 5.5: Ergebnisvergleich für die beiden Hub-Netze

	Hub-Modelle		
	Diesel	eWay kleines Netz	eWay großes Netz
Anzahl SZM im System	1.100	1.100	1.100
Anzahl SZM im System mit KF _{neila}	1.100	1.146	1.146
SUMME Betriebskosten	211.570.960 €	223.082.988 €	219.402.322 €
Anschaffungskosten eWay	- €	17.333.333 €	28.800.000 €
Reparaturkosten eWay	- €	26.000.000 €	43.200.000 €
SUMME Gesamtkosten	211.570.960 €	266.416.321 €	291.402.322 €
CO ₂ -Ausstoß Diesel [t]	159.268	130.922	116.250
CO ₂ -Ausstoß Strom [t]	0	0	0
CO ₂ -Ausstoß Fahrbetrieb [t]	159.268	130.922	116.250
CO ₂ -Ausstoß eWay [t]	0	2.600	4.320
CO ₂ -Ausstoß gesamt [t]	159.268	133.522	120.570
CO₂-Reduktion exklusive eWay		18%	24%
CO ₂ -Kosten exklusive eWay	7.167.061 €	5.891.481 €	5.231.228 €
Systemkosten ohne eWay-Kosten	218.738.021 €	228.974.468 €	224.633.551 €
Kostenerhöhung		4,7%	2,7%
Systemkosten mit eWay-Kosten	218.738.021 €	272.424.801 €	296.827.951 €
Kostenerhöhung		24,5%	35,7%

Würde man den Nutzlastverlust nicht berücksichtigen, dann wäre im kleinen Netz immer noch eine Kostensteigerung von 1,1% vorhanden, im großen Netz aber eine Kostensenkung von 0,8%. Ähnliche Effekte stellen sich ein, wenn man, wie in Abb. 5.29 gezeigt, den Mautsatz auf der eWay-Strecke halbieren würde. Fällt dieser ganz weg, dann ergeben sich in beiden Netzen Kostenvorteile. Den Einfluss der Kaufpreise für neue HO-SZM zeigt die Abb. 5.30, wobei selbst bei einer Differenz von nur 20.000 € gegenüber den Diesel-SZM auf beiden Netzen noch Mehrkosten anfallen würden. Bei jeder der gezeigten Betrachtungen bringt das große Hub-Netz die besseren Werte. Dieses ist auch der Fall, wenn man die erzielten CO₂-Reduktionen auf die anfallenden Mehrkosten bezieht: Im kleinen Netz kostet die Einsparung einer Tonne CO₂ 398 €, im großen Netz noch 152 €. Bezieht man die Trassenkosten mit ein, dann erhöhen sich die Werte auf 2.085 € und auf 2.018 € pro Tonne eingespartem CO₂. Dieser Sprung resultiert aus der Tatsache, dass die Länge des Netzes, und proportional dessen Kosten, um 66% steigen, und wegen der gleichbleibenden Zahl der darauf fahrenden Fahrzeuge die

Laufleistung auf der Elektrostrecke nur um 42% steigt. Dieser Effekt, zunehmender Netzausbau korreliert nicht proportional mit der Netznutzung, wurde bereits in Tabelle 5.3 dargestellt.

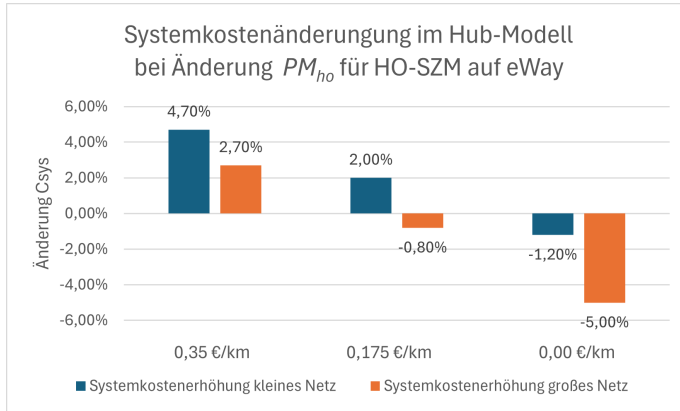


Abbildung 5.29: Änderung der Systemkosten durch Änderung der Mautsätze für HO-SZM auf dem eWay

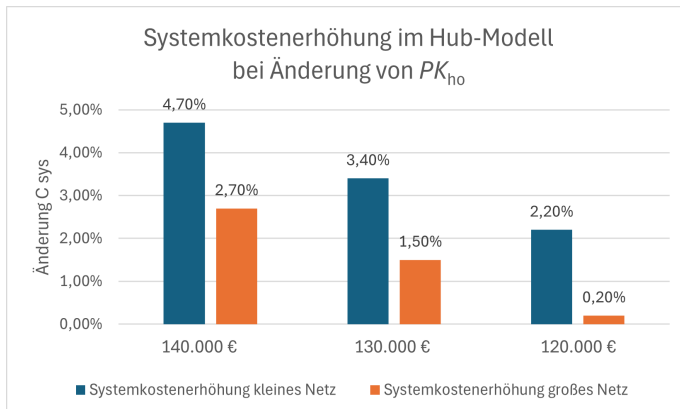


Abbildung 5.30: Einfluss geänderter Kaufpreise für HO-SZM auf Systemkosten C_{sys} im Vergleich zum Dieselbetrieb

Die ermittelten Werte zeigen, dass beide Netze, beginnend mit dem Ausbau des kleineren, als Einstieg in das System eHighway geeignet wären, falls der politische Wille vorhanden wäre. Folgende Punkte sprechen dafür:

- Von Beginn an werden deutliche CO₂-Reduktionen erzielt.
- Das System könnte einer viel größeren Öffentlichkeit vorgestellt werden, und Aussagen zu gesellschaftlicher Akzeptanz könnten auf deutlich breiterer Datenbasis erfolgen, als in den Untersuchungen von Burghard und Scherrer (2020) am Beispiel des eWayBW.
- Die Fuhrparkbetreiber haben Gelegenheit, mit überschaubaren Investitionen Erfahrungen mit dem System zu sammeln.
- Bei geringer staatlicher Förderung ließe sich dieses sogar ohne Mehrkosten im Betrieb machen.
- Der Staat hat insbesondere mit der Gestaltung der Mautsätze, aber auch durch sonstige Förderungen einen wirkungsvollen Hebel, die Umstellung auf das System zu unterstützen.
- Die Begleitforschung könnte auf ein Vielfaches an Daten zugreifen. Anders als auf derzeitigen Teststrecken wären diese weit aussagefähiger, da unterschiedliche Streckenprofile befahren werden.

6 Fallstudie eHighway

In der VDI-Richtlinie 3633 wird im Zusammenhang mit Simulation der Begriff Modell definiert. In Motta et al. (2004, S 26) wird darauf hingewiesen, dass bei Modellvergleichen diese sich innerhalb eines Toleranzrahmens befinden müssen und insbesondere die verwendeten Parameter verifiziert werden müssen.

Diese Fallstudie beschreibt ein theoretisches Szenario und vergleicht unter Verwendung identischer, im Falle von Variation derselben, verifizierter Parameter, verschiedene Verkehrsmodelle. Der Vergleich erstreckt sich über den Zeitraum ab dem Jahr 2025, unterteilt in drei Stufen, über mehrere Jahre. In Abschnitt 6.1 werden die für jede Stufe getroffenen Annahmen beschrieben. Da für diese Zeitspanne keine Preise vorausgesagt werden können, weder für Treibstoffe noch für Anschaffungskosten oder Wiederverkaufswerte, werden die bisher verwendeten aktuellen Werte beibehalten. In Abb. 5.28 wird aber in einem Effektdiagramm gezeigt, wie sich die Systemkosten verändern würden, wenn sich Dieselpreis, Strompreis und die Anschaffungskosten um 25% nach oben oder unten verändern würden und welcher Faktor die größten Auswirkungen hat. Dieses Vorgehen ist zulässig, weil es sich bei der Fallstudie vorrangig um Einfluss und Wirkung des Systems eHighway auf die beschriebenen Hub-, Tramp- und Traktionsverkehre handelt.

Die Abbildungen 6.1 und 6.4 zeigen die Anzahl der SZM, deren Verteilung auf Verkehrsmodelle und deren Antriebsart für die Stufen 1 bis 3. Grau hinterlegte Zellen bedeuten jeweils Dieselantrieb, die grün hinterlegten bedeuten Stromantrieb. Addiert man die jeweils untenstehende Zahl der Fahrzeuge, dann stellt man fest, dass diese nur in der Stufe 1 exakt der am Anfang stehenden Anzahl ZF_{sys}

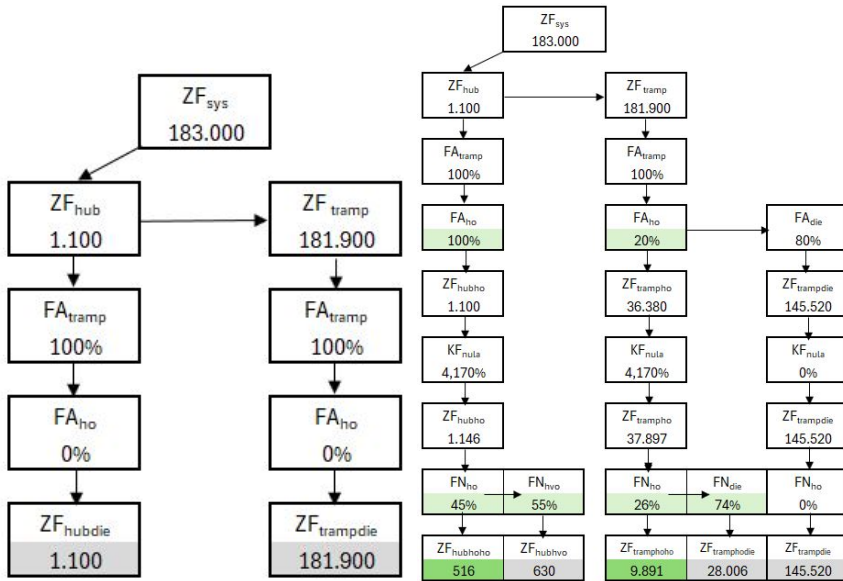


Abbildung 6.1: Fahrzeugzahlen in der Fallstudie für Stufe 1 und Stufe 2

von 183.000 entspricht, in den Stufen 2 und 3 aber wegen Nutzlastverlust und Traktionsverkehr davon abweicht.

6.1 Beschreibung

Stufe 1 im Jahr 2025

Das Umweltbundesamt (2024) hat das Jahr 2023 als weltweit heißestes Jahr seit Beginn der Wetteraufzeichnungen ausgewiesen und der Sommer 2024 war der heißeste in Deutschland. Starkregenereignisse ließen an mehreren Stellen in Deutschland Bäche und Flüsse über die Ufer treten und PKW durch Ortschaften schwimmen. Vor diesem Hintergrund beschließt die neue Bundesregierung das System eHighway einzuführen und sieht in dem weiteren schrittweisen Ausbau einen wesentlichen Beitrag zur CO₂-Reduktion im Straßengüterverkehr.

Annahmen:

- Anzahl Hub-SZM: 1.000
- Anzahl Tramp-SZM: 181.900
- Anzahl HO-SZM: 0
- Länge eWay: 0 km

Die SZM werden gemäß Adolf, Balzer et al. (2016, S 27) zu 99% mit Dieseltreibstoff angetrieben (für die Berechnungen wird 100% angenommen) und einen eWay gibt es, von den Teststrecken abgesehen, nicht.

Betriebs- und Systemkosten sowie der Schadstoffausstoß des Systems werden ermittelt und dienen als Referenz für nachfolgende Vergleiche.

Stufe 2 im Jahr 2028

In der Mitte Deutschlands ist um das Drehkreuz Bad Hersfeld das große Hub-Netz entstanden und die beiden eWay der Ausbaustufe 1 wurden fertiggestellt. Diese Autobahnabschnitte sind in Abb. 6.2 dargestellt.

Annahmen:

- Anzahl Hub-SZM: 1.146
- Anzahl Tramp-SZM: 183.417
- darunter Anzahl HO-SZM: 39.043
- Länge eWay: 1.322 km

Die 1.100 SZM im Hub-Verkehr sind nun HO-SZM mit einem Verbrennermotor und wegen des Nutzlastverlustes wird ihre Zahl auf 1.146 ansteigen. Diese Verhältnisse wurden im vorausgegangenen Abschnitt beleuchtet und in Abb. 6.1 wird dargestellt, welche SZM in welcher Anzahl eingesetzt sind. Da es außer dem Hub-Netz zusätzlich die beiden anderen eWays mit zusammen 890 km Länge gibt,

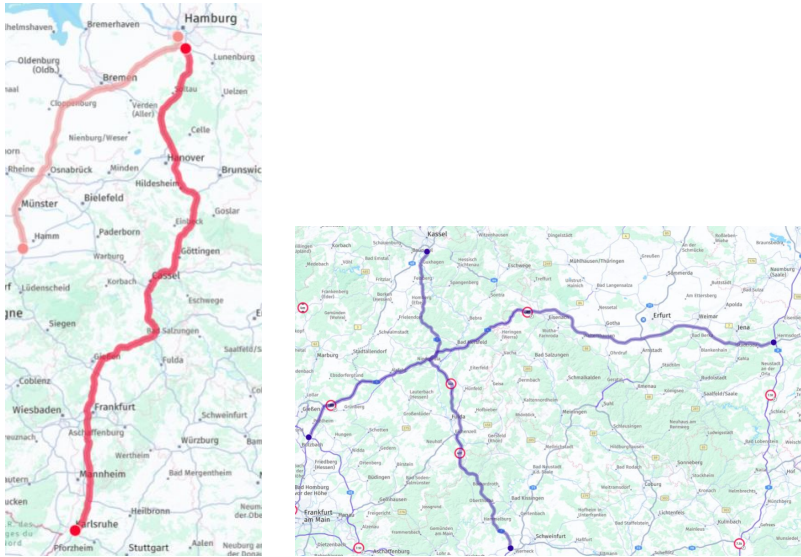


Abbildung 6.2: eWay Ausbaustufe 1 und eWay Hubnetz groß

werden ein Teil dieser HO-SZM auf ihrem Weg zum Hub und wieder zurück diese eWays nutzen können. In Wietschel, Gnann et al. (2017, S 125) wird beschrieben, dass diese beiden Strecken 21% der Transportleistung aufnehmen. Der elektrische Fahrtanteil für Hub-SZM auf dem großen Hub-Netz wurde bereits berechnet und beträgt 30%. Die restlichen 70% der Fahrtstrecken werden zu 21% die beiden anderen eWay nutzen, sodass sich FN_{ho} für die Hub-SZM auf 45% erhöht. Wenn die LKW die Elektrotrasse verlassen, so werden sie mit HVO100-Diesel angetrieben, den sie an ihren Betriebs tankstellen aufnehmen. Bei diesem Treibstoff handelt es sich um zertifiziertes HVO100 mit einem Mehrpreis von 0,20 € je Liter und einem Potenzial zur CO_2 -Ersparnis von 90%.

Die verbleibenden 181.900 SZM sind als Dieselfahrzeuge überwiegend im Trampverkehr unterwegs. Davon wird, mit Bezug auf den erst geringen Netzausbau, ein Anteil von $FA_{ho} = 20\%$ als HO-SZM angenommen. Deren Anzahl wird wegen des Nutzlastverlusts von 36.380 auf 37.895 ansteigen und sie werden laut Wietschel, Gnann et al. (2017, S 125) zu 21% mit Stromantrieb unter der Oberleitung

fahren können. Außerhalb der eWay-Trasse laufen sie mit Dieselantrieb. Da jetzt zusätzlich auch das Hub-Netz befahren werden kann, wird sich FN_{hogesamt} ändern. Mit den Werten aus Wietschel, Gnann et al. (2017, Tab. 52) lässt sich folgende Abschätzung machen:

Die Gruppe 1 (SZM auf eWay-Ausbaustufe 1 mit rund 900 km Länge) steht für 21% Fahrleistung am Gesamtnetz. Die Gruppe 3 (SZM auf eWay-Ausbaustufen 1-3 mit 3.030 km Länge) steht für 51% und die Gruppe 4 (SZM auf eWay-Ausbaustufen 1-4 mit 4.130 km Länge) steht für insgesamt 64%. Der relative Anteil der Verkehrsleistung, bezogen auf die Streckenlänge, sinkt von Gruppe zu Gruppe. Nimmt man, bei vorsichtiger Annahme, den Unterschied zwischen den Gruppen 3 und 4 als Maßstab, dann lässt sich für die 432 km des großen Hubnetz eine Steigerung von FN_{ho} in Höhe von 5,1% herleiten und FN_{hogesamt} beträgt 26,1%.

Zusammen mit den im Trampverkehr laufenden SZM erhöht sich die Gesamtzahl der Fahrzeuge im System durch den Einfluss von KF_{nula} bei den HO-SZM auf insgesamt 184.563 SZM. Dieses hat Einfluss auf die Betriebs- und damit auf die Systemkosten.

Maut ab 01.01.2026 in Cent/km (unter Vorbehalt)

Fahrzeug	>3,5 t bis <7,5 t		7,5 t bis <12 t		12 t bis 18 t		>18 t mit bis zu 3 Achsen		>18 t mit 4 Achsen		>18 t mit 5 oder mehr Achsen	
	neu	alt	neu	alt	neu	alt	neu	alt	neu	alt	neu	alt
Euro VI	15,1	17,7	9,8	23,8	14,0	30,3	18,1	32,4	19,0	34,8	19,0	
Euro V/EEV	18,9	20,5	12,6	27,5	17,7	35,3	22,1	36,3	22,9	38,9	22,9	
Euro IV	20,1	22,1	14,2	28,6	18,8	37,1	23,9	38,8	25,4	41,4	25,4	
Euro III	22,5	25,0	17,1	32,8	22,6	42,9	29,3	45,4	31,6	47,8	31,6	
Euro II	24,4	27,5	19,6	34,8	24,6	45,9	32,3	48,7	34,9	51,1	34,9	
Euro I / O	24,8	27,6	19,7	35,0	24,8	48,4	32,8	51,2	35,4	51,6	35,4	
Emissionsfrei	0,028		0,034		0,044		0,053		0,052		0,052	

CO 2-Maut ab Dezember 2023

Abbildung 6.3: Mauttabelle der Straßenverkehrsgenossenschaft Frankfurt

Stufe 3 im Jahr 2030

Die Anzahl der HO-Fahrzeuge im System ist größer geworden und FA_{ho} beträgt nun 25%, entsprechend dem in Wietschel, Gnann et al. (2017, S 4) angesprochenen „optimistischen Szenario“. Ein Unternehmen bietet entlang des eWay zwischen Karlsruhe und Hamburg und zwischen Hamburg und Kreuz Kamen Traktionsverkehr an und stellt im Abstand von ungefähr 75 km Umschlagplätze zur Verfügung, auf denen Trailer bereitgestellt und wieder abgeholt werden können. Buchung und Abrechnung erfolgen über ein webbasiertes Buchungssystem.

Annahmen:

- Anzahl Hub-SZM: 1.146
- Anzahl Tramp-SZM: 174.607
- Anzahl Traktions-SZM: 7.390
- darunter Anzahl HO-SZM: 48.518
- darunter Anzahl Batterie-SZM: 5.021
- Länge eWay: 1.322 km

Die Hub-SZM fahren, wie in Stufe 2 beschrieben, mit Strom unter der Oberleitung und außerhalb des eWay mit HVO100-Diesel. Mit der Annahme $FA_{trak} = 5\%$ fahren von den 181.900 restlichen SZM nun 9.095 SZM im Traktionsverkehr. Die Differenz von 172.805 SZM fahren im Trampverkehr und für sie gelten die Bedingungen aus Stufe 2: Mit Faktor FA_{ho} werden davon 25% als HO-Fahrzeuge angenommen und deren Zahl erhöht sich wegen des Nutzlastverlustes auf 45.003 HO-SZM. Diese fahren, wie oben hergeleitet, zu 26,1% unter der Oberleitung im Stromantrieb, ansonsten im Dieselantrieb. Die restlichen 75% Trampfahrzeuge fahren durchgehend im Dieselantrieb und ihre Zahl wird nicht durch den Nutzlastfaktor verändert.

Von der für den Traktionsverkehr hergeleiteten Fahrzeuganzahl fahren, wie im Abschnitt 3.2 beschrieben, 25% im Pendelverkehr auf der Traktionsstrecke mit

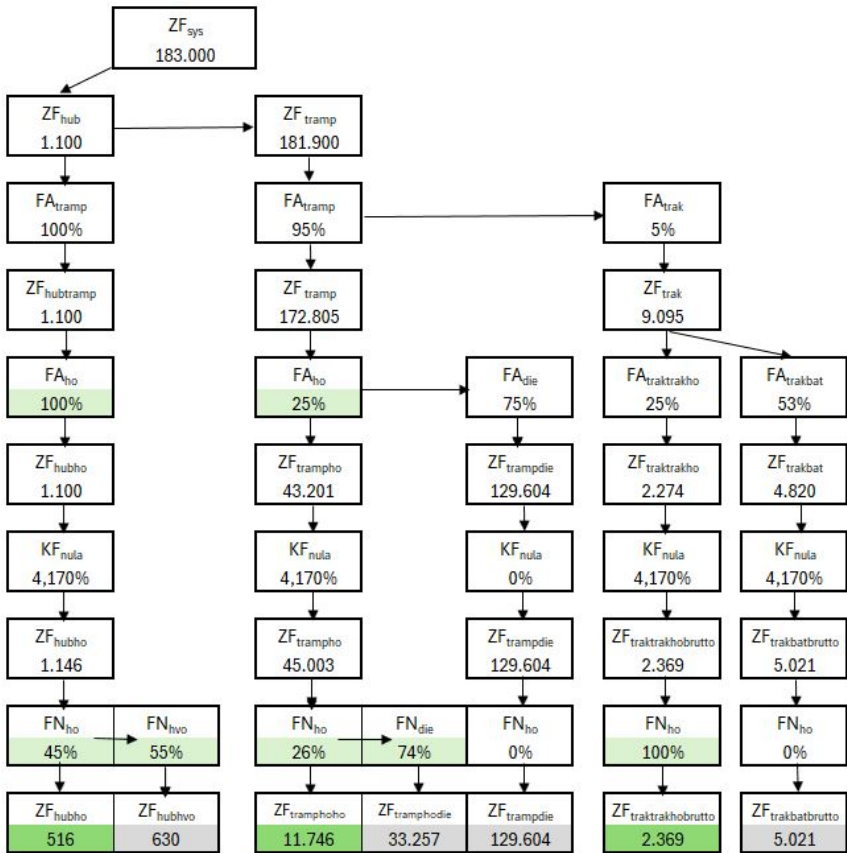


Abbildung 6.4: Fahrzeugzahlen in der Fallstudie für Stufe 3

Strom aus der Oberleitung. Für die kurzen Distanzen zwischen den Umschlagpunkten und der Traktionsstrecke unter der Oberleitung sorgt eine Batterie für Antriebsenergie. Da es sich um HO-SZM handelt, wird sich gemäß KF_{nula} ihre Zahl auf 2.369 erhöhen. Die Zahl der im Nahverkehr um die Umschlagpunkte eingesetzten SZM errechnet man mittels $FA_{trakhyb}$. Dessen Ermittlung wurde ebenfalls im Abschnitt 3.2 beschrieben. In der Fallstudie, in der 2 Belade- und 1 Entladestelle angenommen worden sind und Batterie-Fahrzeuge im Nahverkehr

laufen, erhält man für FA_{trakbat} den Wert 53% und damit 4.820 Nahverkehrs-SZM. Diese haben keine HO-Ausrüstung und fahren ausschließlich mit Batterieantrieb. Auch ihre Anzahl steigt wegen des Nutzlastverlustes. Die Gesamtanzahl der SZM im System ist mit 183.143 fast identisch mit der Ausgangssituation in Stufe 1 und Abb. 6.4 zeigt Herleitung und Einsatz.

6.2 Berechnungen

Die Einflüsse des HO-Systems in Stufe 2 werden in Tabelle 6.1 gezeigt: Die Systemkosten steigen um rund 1%, die Betriebskosten der Lastzüge sind annähernd unverändert. Die Reduktion des CO_2 -Ausstoßes ist mit 4,8% weit von den Zahlen entfernt, die man aus den Rechnungen für das Kernnetz im eingeschwungenen Zustand herleitet.

Die nur geringfügige Senkung der Betriebskosten hat folgende Gründe:

- Bau- und Unterhaltskosten für die eWay-Trasse kommen hinzu.
- KF_{nula} erhöht die Zahl der Fahrzeuge im System um 0,85%.
- Im Hub- und im Trampverkehr gibt es HO-Fahrzeuge mit einem um 40% höheren Kaufpreis.
- $FA_{\text{ho}} = 20\%$ und $FN_{\text{hogesamt}} = 26,1\%$ sind im Vergleich zum eingeschwungenen Zustand ($FA_{\text{ho}} = 73\%$ und $FN_{\text{hogesamt}} = 60\%$) sehr niedrig.
- die LKW im Hub-Verkehr nutzen außerhalb der Oberleitung HVO100 mit einem um 0,20 €/l höheren Preis.

Die generellen Voraussetzungen für eine hohe Effizienz von Traktionsverkehr wurden im Abschnitt 3.2 beschrieben und sind in die Berechnungen für die Stufe 3 eingeflossen. Deren Ergebnisse sind in Tabelle 6.2 dargestellt und bestätigen die Erkenntnisse aus den Parameterstudien: Das HO-System kann den

Tabelle 6.1: Einfluss System eWay auf das Hub-Tramp-Modell

	Hub-Tramp-Modell	Hub-HO-Tramp-Modell	Veränderung durch eWay
Anschaffungskosten Kfz	3.614.250.000 €	4.035.492.636 €	11,7%
Anschaffungskosten Trassen	- €	88.133.333 €	
Anschaffungskosten Umschlagplatz	- €	- €	
Anschaffungskosten gesamt	3.614.250.000 €	4.123.625.969 €	14,1%
Betriebskosten Kfz	31.258.437.581 €	31.245.578.076 €	0,0%
Betriebskosten Trasse	- €	8.813.333 €	
CO ₂ -Kosten gesamt	982.557.682 €	935.343.270 €	-4,8%
Systemkosten	35.855.245.263 €	36.313.360.648 €	1,3%
CO ₂ -Ausstoß Kfz [t]	21.834.615	20.781.086	-4,8%
CO ₂ -Ausstoß Trassen [t]	-	13.220	
CO₂-Ausstoß gesamt	21.834.615	20.794.306	-4,8%

CO₂-Ausstoß senken, wenn FA_{ho} eine Mindestgröße übersteigt. Der Traktionsverkehr auf dem eWay verstärkt diesen Effekt zusätzlich, sodass die CO₂-Minderung gegenüber dem Hub-Tramp-Modell um rund 80% steigt und jetzt 8,7% beträgt. Die Betriebskosten für den Fuhrpark steigen um 0,8%. Damit sind die sehr hohen Anschaffungskosten der im Nahverkehr um die Umschlagpunkte eingesetzten Batterie-SZM annähernd voll kompensiert, obwohl auch für diese LKW die höchsten Mautsätze angesetzt worden sind. Die Systemkosten steigen unter Einbeziehung der Kosten für Umschlagplätze und Buchungsgebühren um 1,5%.

Über Hub- und über Trampverkehr liegen langjährige, praktische Erkenntnisse vor, über Traktionsverkehr noch nicht. In Bernecker et al. (2020) werden mit Blick auf mögliche eWay in Schweden und in Deutschland umfangreiche Überlegungen zu neuen Geschäftsmodellen gemacht und vor allem auf Bau und Unterhalt der Infrastruktur sowie auf die Versorgung mit Strom geblickt. Das Geschäftsmodell *Traktionsverkehr* findet sich dort allerdings nicht. Wietschel, Gnann et al. (2017) untersuchen im Abschnitt *Marktpotentiale vor und nach 2030* das Geschäftsmodell *Traktionsdienstleister*, auch in Verbindung mit internationalen Transporten, billigen diesem aber „mit den heutigen Kostenannahmen keine Wirtschaftlichkeit“ zu. Die Annahmen in den Berechnungen zu Stufe 3 sind demnach

Tabelle 6.2: Einfluss von eWay und Traktionsverkehr auf Hub-Traktionsmodell

	Hub-Tramp-Modell	Hub-HO-Trak-Modell	Veränderung durch eWay
Anschaffungskosten Kfz	3.614.250.000 €	4.365.021.322 €	20,8%
Anschaffungskosten Trassen	- €	111.466.667 €	
Anschaffungskosten Umschlagplatz	- €	853.715 €	
Anschaffungskosten gesamt	3.614.250.000 €	4.477.341.704 €	23,9%
Betriebskosten Kfz	31.258.437.581 €	30.995.108.530 €	-0,8%
Betriebskosten Trasse	- €	11.146.667 €	
CO ₂ -Kosten gesamt	982.557.682 €	896.999.528 €	-8,7%
Systemkosten	35.855.245.263 €	36.380.596.428 €	1,5%
CO ₂ -Ausstoß Kfz [t]	21.834.615	19.920.103	-8,8%
CO ₂ -Ausstoß Trassen [t]	-	13.220	
CO₂-Ausstoß gesamt	21.834.615	19.933.323	-8,7%

theoretisch und werden nachfolgend anhand dreier Faktoren auf Plausibilität und praktische Umsetzung überprüft:

1) Teilnehmerzahl am Traktionsverkehr

Mit Verweis auf die in Abschnitt 3.2 hierzu gemachten Ausführungen: Laut Göckeler, Hacker et al. (2020, S 14) entfallen zwei Drittel aller LKW-Fahrten auf den Nahverkehr bis 50 km, und die durchschnittliche Fahrtweite im Straßengüterfernverkehr beträgt 313 km. In Wietschel, Gnann et al. (2017, S 118) wird festgestellt, dass 89% der LKW-Fahrten weniger als 50 km im nachgeordneten Netz abwickeln würden, falls das gesamte Autobahnnetz elektrifiziert wäre. Im beschriebenen Modell nehmen die eWay nur einen Anteil von rund 10% am deutschen Autobahnnetz ein und die Fahrtstrecken außerhalb der Oberleitung werden größer. In Abb. 6.5 wird im linken Teil der eWay zwischen Karlsruhe und Hamburg als Linie dargestellt. Das Einzugsgebiet mit einer Tiefe von 100 km rechts und links der Autobahn zeigt, welche Städte von Umschlagpunkten entlang dieser Linie erreicht werden könnten. Das Schaubild rechts zeigt die aus dieser Tiefe resultierende längste Entfernung zu einem Umschlagpunkt für Traktionsverkehr. Tatsächlich dürfen die Entfernungen vom Umschlagpunkt zur weitesten

Be- oder Entladestelle aber maximal 50 km betragen, wenn der Traktionsverkehr wirtschaftlich sein soll. Das bedeutet eine Einschränkung der tatsächlich in Frage kommenden Touren. Gleichzeitig braucht das System eine kontinuierliche Auslastung zur Deckung der bereitgestellten Infrastruktur aus Traktionsfahrzeugen und Umschlagplätzen. In diesem Zusammenhang besteht weiterer Forschungsbedarf bezüglich Zahl und Verteilung von Bevölkerung und Wirtschaftsunternehmen entlang der Strecke.

2) Umschlagpunkte für Traktionsverkehr

An den Umschlagpunkten werden Parkplätze für die Trailer vorgehalten, die im Traktionsverkehr unterwegs sind, aber nicht auf einer der Zugmaschinen aufgesattelt sind. Im Referenzmodell sind im Trampverkehr täglich 181.900 Touren abzuwickeln und dafür werden 181.900 Trailer benötigt, die jeweils hinter einem SZM laufen. In Stufe 2 der Fallstudie erhöht sich bei den HO-SZM die Zahl der Trailer wegen KF_{nula} und das gilt auch für die in Stufe 3 im Traktionsverkehr angenommenen 5% der Fahrzeuge. Im Abschnitt 4.2.1 wird gezeigt, wie die Anzahl der benötigten Trailerstellplätze ermittelt wird, dort allerdings bezogen auf zwei Umschlagpunkte, einer an jedem Endpunkt der Traktionsstrecke.

Im mittleren Schaubild der Abb. 6.5 sind mit den Umschlagpunkten 1 bis 9 (UP 5a und UP 5b würden zu einem UP zusammengelegt werden) plus den beiden am Beginn und am Ende insgesamt 11 Umschlagpunkte vorhanden. Entlang der zweiten Strecke zwischen Hamburg und Autobahnkreuz Unna würden bei gleichem Vorgehen weitere 6 Umschlagpunkte dazukommen, so dass die errechneten 1.739 Trailerstellplätze auf 17 Umschlagpunkte zu verteilen wären. Je Umschlagpunkt müssten also rund 100 Trailerstellplätze vorhanden sein, was einer der großen Rastanlagen entspricht, ähnlich der in Abb. 6.6 dargestellten Autobahnraststätte an der BAB 5 bei Baden-Baden. Innerhalb der im rechten Bild dargestellten Umrandung befinden sich 110 Stellplätze auf einer Fläche von rund 26.000 qm, was einem Platzbedarf von rund 236 qm je Stellplatz entspricht und sehr nahe an dem Wert liegt, der in Abschnitt 3.2.1 für große Parkplatzanlagen vorausgesagt worden ist.

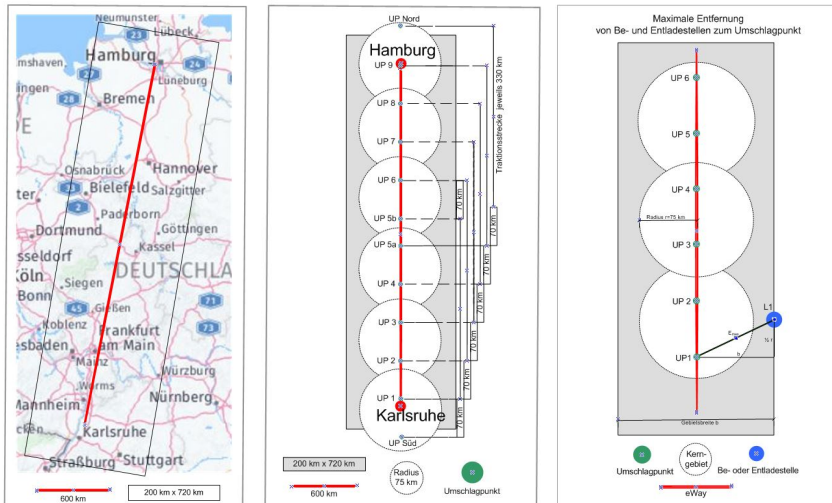


Abbildung 6.5: Traktionsverkehr zwischen Karlsruhe und Hamburg

Der Jahresbericht des BGL Bundesverband Güterverkehr Logistik und Entsorgung eV. (2017, S 69-70) beschäftigt sich auch mit Zahl, Qualität und Sicherheit von LKW-Parkplätzen entlang der Autobahnen und verweist auf kommende Geschäftsmodelle im Zusammenhang mit der Buchung von Stellplätzen per Internet. Momentan sind die Parkplätze, beginnend mit den frühen Abendstunden, meist so überfüllt, dass LKW-Fahrer wegen ablaufender Lenkzeiten ihre Lastzüge teilweise an den Ein- und Ausfahrten nahe des vorbeifahrenden Verkehrs parken. Dieses Problem besteht bereits ohne die für den Traktionsverkehr erforderlichen Umschlagpunkte. Die Richtlinie Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2021) vom 10.06.2021 stellt dazu fest: Dem festgestellten Mangel von 23.000 LKW-Parkplätzen soll mit einer staatlichen Förderung begegnet werden, und diese betrifft den Neubau, den Ausbau und die Ertüchtigung von LKW-Rastanlagen entlang der Bundesautobahnen. Begünstigte können Privatpersonen oder Firmen aus dem In- und Ausland sein, und es wird darauf hingewiesen, dass solche „zusätzlichen Lkw-Parkplätze“ und „zusätzlichen Lkw-Stellplätze“ inklusive der Zu- und Abfahrten nicht zu den öffentlichen Straßen zählen und in privatem Eigentum stehen.



Abbildung 6.6: Autobahnrastanlage Baden-Baden (Quelle: Google Earth)

3) Wirtschaftlichkeit von Traktionsverkehr

Die Wirtschaftlichkeit des Traktionsverkehrs wird überprüft durch Vergleich der Kilometerkosten. Da die Hub-Verkehre in allen drei Stufen nicht Bestandteil des Traktionsverkehrs sind, beziehen sich die Ergebnisse in Tabelle 6.3 nur auf die Fahrzeuge im Tramp- und im Traktionsverkehr. Die ausgewiesenen Zahlen beinhalten keine Gemeinkosten, kalkulatorischen Kosten und Ansätze für Finanzierung, da diese in dieser Arbeit systemübergreifend als gleich angenommen werden.

Es zeigen sich nahezu gleiche Kilometerkosten bei allen drei Modellen mit leichten Vorteilen für das Traktionsmodell, wenn Bezug auf die Betriebskosten genommen wird. Es bestätigen sich die Erkenntnisse in den vorangegangenen Abschnitten dieser Arbeit: Kleine Werte von FA_{ho} und FA_{trak} führen nicht zu geringeren Kosten. Mit den in dieser Fallstudie verwendeten Werten kann der HO-Traktionsverkehr im Vergleich zum HO-Trampverkehr keine nennenswerten Kostenänderungen bewirken. Die Gründe liegen in:

- den hohen Kosten der Batteriefahrzeuge ohne Kompensation durch staatliche Förderung bei Anschaffung und Mauteinstufung
- den Kosten für die Umschlagplätze
- den Buchungsgebühren

Tabelle 6.3: Vergleich der Kilometerkosten

	Kilometerkosten ohne Hub-Verkehr		
	DIE-Tramp-Modell	HO-DIE-Tramp-Modell	HO-DIE-Trak-Modell
Anschaffungskosten Kfz	3.592.525.000 €	4.001.403.003 €	4.330.931.690 €
Anschaffungskosten Trassen	- €	59.333.333 €	82.666.667 €
Anschaffungskosten Umschlagplatz	- €	- €	853.715 €
Anschaffungskosten gesamt CA_{gesamt}	3.592.525.000 €	4.060.736.337 €	4.414.452.072 €
Betriebskosten Kfz CB_{kfz}	31.058.524.595 €	31.062.614.173 €	30.812.144.627 €
Betriebskosten Trasse CB_{tras}	- €	5.933.333 €	8.266.667 €
Betriebskosten gesamt CB_{gesamt}	31.058.524.595 €	31.068.547.507 €	30.820.411.294 €
Gesamtkosten $C_{\text{gesamt}} = CA_{\text{gesamt}} + CB_{\text{gesamt}}$	34.651.049.595 €	35.129.283.843 €	35.234.863.366 €
CO ₂ -Kosten CC	975.761.368 €	931.233.785 €	892.890.042 €
Systemkosten $C_{\text{sys}} = C_{\text{gesamt}} + CC$	35.626.810.963 €	36.060.517.628 €	36.127.753.408 €
Laufleistung im System [km]	22.308.216.000	22.494.043.439	22.471.502.443
Kilometerkosten (CB_{gesamt})	1,39 €	1,38 €	1,37 €
Kilometerkosten (C_{sys})	1,60 €	1,60 €	1,61 €

Die Betriebskosten für das in Stufe 3 der Fallstudie untersuchte HO-DIE-Traktionsmodell berücksichtigen:

Kaufpreis für Batterie-SZM $PK_{\text{bat}} = 300.000 \text{ €}$

Mautsatz für HO- und für Batterie-SZM $PM_{\text{ho}} = 0,35 \text{ €/km}$

Würden die folgenden Werte in die Berechnungen einfließen:

Kaufpreis für Batterie-SZM $PK_{\text{bat}} = 200.000 \text{ €}$ (im Frühjahr 2025 werden von Fahrzeugherstellern ähnliche Preise genannt)

Mautsatz für SZM im Stromantrieb $PM_{\text{ho}} = 0,052 \text{ €/km}$ (soll ab 01.01.2026 für Stromantrieb gelten)

dann würden die Betriebskosten der Fahrzeuge um knapp 6% sinken und das beschriebene Modell an Attraktivität gewinnen.

Für die Erlösseite und die Umsatzrenditen sind die Ergebnisse in Tabelle 6.4 dargestellt:

- Die zuvor errechneten Kosten müssen um einen Anteil für die noch nicht berücksichtigten Gemeinkosten erhöht werden. Eine Indikation liefert die als Abb. A.5 im Anhang abgelegte Kostenrechnung der SVG, wo für Gemeinkosten ein Anteil von 7,1% an den Gesamtkosten angeführt wird.
- Die Erlöse errechnen sich für alle Modelle identisch aus der Zahl der Touren im System multipliziert mit dem Frachterlös. Die Zahl der Touren war für jedes Modell mit 183.000 vorgegeben, der Frachterlös je Tour wurde in Abschnitt 5.2 mit 948 € bestimmt.
- Tatsächlich werden nicht alle der in den mathematischen Modellen theoretisch errechneten Kilometer auch bezahlt. Mit dem Faktor KF_{leer} werden die theoretischen Werte um den Leerfahrtanteil vermindert.
- Den so ermittelten tatsächlichen Frachterlösen werden die um die Gemeinkosten erhöhten Kosten aus den Modellen gegenübergestellt.

Tabelle 6.4: Vergleich der Umsatzrenditen

	Umsatzrenditen ohne Hub-Verkehr		
	DIE-Tramp-Modell	HO-DIE-Tramp-Modell	HO-DIE-Trak-Modell
Anzahl Touren	183.000	183.000	183.000
Frachterlös je Tour theoretisch	948 €	948 €	948 €
Frachterlös theoretisch pro Jahr	41.636.160.000 €	41.636.160.000 €	41.636.160.000 €
Leerfahrtanteil	20,00%	20,00%	20,00%
Frachterlös tatsächlich pro Jahr	33.308.928.000 €	33.308.928.000 €	33.308.928.000 €
jährliche Betriebskosten Kfz pro Jahr	31.058.524.595 €	31.068.547.507 €	30.820.411.294 €
Gemeinkostenanteil an Gesamtkosten	7,10%	7,10%	7,10%
Gesamtkosten pro Jahr	33.432.211.620 €	33.443.000.545 €	33.175.900.209 €
Deckungsbeitrag	- 123.283.620,02 €	- 134.072.545,32 €	133.027.791,25 €
Umsatzrendite	-0,37%	-0,40%	0,40%

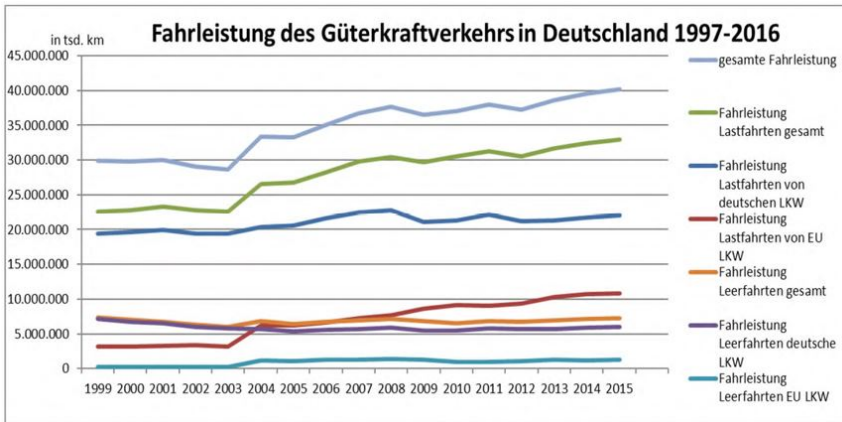


Abbildung 6.7: Leerfahrten im Güterkraftverkehr

In Liedtke (2020, Folie 16) wird von zunächst gefallenen Leerfahrtanteilen berichtet, bis diese aber im Zeitraum 2010 bis 2015 stabil bleiben. Für die deutschen LKW im Güterkraftverkehr lässt sich aus Abb. 6.7 für das Jahr 2015 ein Leerfahrtanteil von etwa 30% ablesen. Dieser Wert beinhaltet Transporte, bei denen die LKW zu 100% nach Entladung leer zurückfahren. Beispiele hierfür sind Tanklastzüge für die Tankstellenversorgung, LKW von Molkereien, die jeweils leer zu den Aufnahmestellen fahren, und Fahrzeuge im Werkverkehr, die nur hin und wieder Vorprodukte aufnehmen und an die Produktionsstätte transportieren. Abgesehen von solchen Einsätzen ist im gewerblichen Güterfernverkehr ein so hoher Leerfahrtanteil nicht die Regel und kann durch Annahme von Touren aus Frachtenbörsen auch verhindert werden, wenn auch unter Hinnahme schlechter Frachtraten. Die Bedeutung der Leerfahrtanteile zeigen folgende Zahlen: Ein Leerfahrtanteil von 25% bringt mit Umsatzrenditen von -7,1%, -7,1% und -6,2% bei allen Modellen keine Kostendeckung mehr. Für 20% liegen alle Modelle bei ungefährender Kostendeckung (siehe Tab. 6.4). Erst für 15% Leerfahrtanteil zeigen sich mit 5,5%, 5,5% und 6,3% deutlich positive Werte, die im Schnitt sogar höher sind, als derzeit für reine Frachtführerbetriebe üblich.

6.3 Bewertung

Die Kosten für die Batterie-SZM dürfen über die nächsten Jahre als sinkend angenommen werden und im September 2024 wird wieder über eine Förderung beim Kauf von E-Fahrzeugen gesprochen (Autogipfel zwischen Wirtschaftsminister und Vertretern der Automobilindustrie und Gewerkschaften am 25.09.2024). Bei den Anschaffungskosten für E-LKW könnten sich demnach Kostenvorteile ergeben. Bei den Diesel-LKW sind die Preise im September 2024 stark unter Druck und liegen je nach Abnahmezahl um 100.000 € (Aussage der Speditionen Döpke und Kleinwächter). Im Frühjahr 2025 berichten beide Firmen über wieder deutlich gestiegene Preise für neue Sattelzugmaschinen. In Abb. 4.2.1 wurde der Effekt von geänderten Preisen bei Treibstoffen und Kfz-Preisen gezeigt und man sieht den deutlich größten Effekt bei Änderung des Dieselpreises. Bei den Kosten für die Umschlagplätze sind auf lange Sicht Kostensenkungen nicht zu erwarten, da sie bei immer weniger freien Grundstücken im Wettbewerb stehen, nicht nur mit dem Ausbau vorhandener Parkplatzanlagen für den Trampverkehr, sondern auch mit den geplanten Ladeparks in der Nähe der Haupttrouten. Der Aufbau eines Traktionsverkehrs für viele unterschiedliche Teilnehmer wird Zeit in Anspruch nehmen und sowohl die Traktionsfahrzeuge als auch die Umschlagplätze werden nicht von Anfang an ausgelastet sein.

Dennoch ist das Geschäftsmodell Trakteur damit noch nicht chancenlos: Betrachtet man alleine die Traktionsfahrzeuge im Traktionspendelverkehr, dann sind deren Kosten niedriger als die in Tabelle 6.3 ausgewiesenen: Durch den Einsatz im Zweischichtbetrieb werden hohe Fahrleistungen je SZM erzielt und diese werden mit Strom gefahren, entweder aus der Oberleitung oder aus der Batterie. Die Antriebskosten und Mautkosten sind günstiger als die der Dieselfahrzeuge im Trampverkehr. Dies gilt auch für die Personalkosten, da ausschließlich Nahverkehrsfahrer im Einsatz sind. Vorstellbar wären daher Traktionsmodelle zwischen kooperierenden Spediteuren oder Netzwerken, ähnlich den heutigen Begegnungsverkehren. Wenn sich solche Betriebe nicht mit den in die Kostenberechnungen eingeflossenen Buchungsgebühren belasten müssten und Umschlagpunkte entweder auf vorhandenen Rastanlagen oder eigenen Betriebshöfen dargestellt werden,

können solche Traktionsverkehre einen größeren Kostenvorteil bringen. Mit Hinweis auf die Aussagen in Abschnitt 3.2 sind Teilnehmerzahlen von mehr als den in der Fallstudie angenommenen 5% nicht wahrscheinlich, solange bilateral und im Transitverkehr tätige Frachtführer als Teilnehmer ausscheiden.

7 Zusammenfassung

In den Zeitraum der Erstellung dieser Arbeit fallen mehrere Ereignisse, die Politik, Wirtschaft und Gesellschaft vor außergewöhnliche Herausforderungen stellen und Einfluss auf das Thema dieser Arbeit haben:

- Die sich seit dem Frühjahr 2020 ausbreitende Coronavirus-Pandemie führt zu einem Nachlassen der Wirtschaftsleistung und in 2024 wird bei Vergleichen noch immer auf den Vorcoronastatus verwiesen. Die Verkehrszahlen stagnieren und Homeoffice verändert die Arbeitswelt.
- Im Februar 2022 wird die Ukraine angegriffen und befindet sich seitdem in einem Verteidigungskrieg, in dem sie unter Einsatz hoher Milliardenbeträge unterstützt wird. Ein Großteil dieser Unterstützung kommt aus Deutschland, wo ungefähr 1 Million Flüchtlinge aus der Ukraine aufgenommen worden sind, zusätzlich zu den ohnehin hohen Zahlen an Immigranten, die Schutz oder ein besseres Leben in Deutschland finden wollen.
- In Folge des russischen Angriffs auf die Ukraine endet die langjährige Versorgung der deutschen Wirtschaft und der Privathaushalte mit billigem russischen Gas. Sinkende Mengen am Markt und der Bezug von zuvor verflüssigtem Gas mit Tankern aus den USA und aus Golfstaaten führt zu steigenden Preisen, und der Einsatz der mit Gas betriebenen LKW wird unrentabel. Die Inflation in Deutschland steigt 2022 auf den höchsten Wert seit 20 Jahren.
- Das Bundesverfassungsgericht erklärt im Herbst 2023 den Bundeshaushalt für nicht verfassungskonform und zwingt die Bundesregierung zu Einschnitten in die Budgets der Ministerien. In den letzten Wochen des Jahres 2023

wird die Förderung beim Kauf von E-Autos gestoppt, mit der Folge, dass die Neuzulassungen von E-PKW im Jahr 2024 stark zurückgehen.

- Unter dem Stichwort *Energieoffenheit* wirbt zunächst die FDP, später auch die CDU/CSU für das Aussetzen des *Verbrennerverbots* ab 2035 und seit April 2024 kann auch in Deutschland der in 1.4.7 beschriebene synthetische Dieselmotorkraftstoff HVO100 gekauft werden.

Das alles belastet die Staatskasse und schränkt die Handlungsfähigkeit der Regierung ein. Das ifo-Institut in München stellt im September 2024 den vierten Rückgang des *ifo Geschäftsklimaindex* hintereinander fest und sieht die hohe Sparquote der privaten Haushalte als Indiz für die Verunsicherung der Bevölkerung (ifo Institut, 2024).

Vor diesem Hintergrund und unter dem Eindruck der weltweit zunehmenden Verwüstungen durch Stürme, Starkregen, abrutschende Berghänge und steigende Meeresspiegel müssen Entscheidungen getroffen werden und Aktionen folgen. Die Notwendigkeit zur Dekarbonisierung unseres Lebens ist nicht kleiner geworden. Ob das System Highway dabei helfen kann und ob es bezahlbar ist, untersuchte die vorliegende Arbeit in folgenden Schritten:

Nachdem in Abschnitt 1.4 wesentliche Begriffe und deren Bedeutung im weiteren Verlauf erklärt worden waren,

beschrieb das Kapitel 2 das System eHighway mit seinen Hauptbestandteilen sowie den möglichen Ausbau eines Oberleitungsnetzes. Dessen Eignung als eWay wurde anhand der Auswertung von fast 1.000 Tourdaten untersucht.

Kapitel 3 ging mit Blick auf das GüKG auf die Rahmenbedingungen für Betriebsmodelle im Güterkraftverkehr ein, bevor diese in den Abschnitten 3.1 bis 3.4 dargestellt wurden.

In Kapitel 4 wurden die mathematischen Zusammenhänge erläutert und Formeln aufgestellt, anhand derer

in Kapitel 5 berechnet wurde, wie sich unter veränderten Parametern der CO₂-Ausstoß, die Frachterlöse und die Kosten in den Betriebsmodellen entwickeln. Abschnitt 5.5 untersuchte, ob die Hub-Verkehre der deutschen Speditionsnetzwerke und großer Handelsunternehmen einen Einstieg in das System eHighway erleichtern könnten.

Kapitel 6 beschrieb die mögliche Veränderung heute existierender Hub- und Trampverkehre nach Einführung des Systems eHighway in Kombination mit hybriden Antrieben unter Einbeziehung von Traktionsverkehren.

Schließlich erfolgte die Beantwortung der drei im Abschnitt 1.3 formulierten Kernfragen zu:

- **CO₂-Ausstoß:**

Bei allen untersuchten Modellen bringt die Einbeziehung des eWay eine Senkung des CO₂-Ausstoßes. In der Fallstudie sind wegen der kleinen Zahl an HO-LKW die Einsparungen nicht größer als 10%. Gibt man in die gleiche Berechnungsmatrix die Werte ein, die man in den Forschungsberichten nach Markthochlauf für das Jahr 2030 annimmt, dann liegen, wie in Abb. 5.6 gezeigt, die möglichen Einsparungen bei 40%. Es bestätigen sich die Feststellungen in den zitierten Forschungsberichten, dass mit den Bedingungen des eingeschwungenen Zustands die angekündigten CO₂-Reduzierungen im Trampverkehr bei annähernder Kostengleichheit zu erreichen sind. Die eigenen Berechnungen haben gezeigt, dass im Traktionsmodell die Senkung des CO₂-Ausstoßes nicht nur mit geringeren Kosten für die Fuhrparkbetreiber einhergeht, sondern sogar die Systemkosten sinken.

- **Betriebskosten:**

Die Berechnungen im Kapitel 5 belegen, dass die derzeit noch hohen Anschaffungspreise für HO-LKW und Batterie-LKW durch die geringeren Betriebskosten kompensiert werden, selbst wenn man den Nutzlastverlust einbezieht.

- **Systemkosten:**

Aus volkswirtschaftlicher Sicht sind die Systemkosten ausschlaggebend, da in diesen auch Bau und Unterhalt der eWay-Trasse enthalten sind, sowie im Falle des Traktionsverkehrs die Kosten für die Umschlagpunkte. Wie in Abb. 5.1 für den Vergleich zwischen dem Diesel-Modell und dem HO-Diesel-Modell gezeigt wird, kommt es bei den Systemkosten zumindest zu leichten Vorteilen des eWay. Beim Trampverkehr treten diese erst ab einem Zertifikatspreis von 135 € auf, beim Traktionsmodell bereits bei einem Preis von 90 € je Tonne CO₂. Falls bilaterale Transporte und Transitverkehre ebenfalls Teilnehmer am HO-Verkehr werden, können die positiven Effekte noch deutlicher werden. Allerdings ist zu vermerken, dass in der Vergleichsrechnung die HO-LKW den vollen Mautsatz zahlen und keine Kaufpreisförderung erhalten. Der zunehmende Wegfall von Einnahmen aus der Mineralölsteuer durch den steigenden elektrischen Fahranteil ist ebenfalls zu beachten.

Die Beantwortung der weiteren Fragen aus Abschnitt 1.3 kann wie folgt zusammengefasst werden: Mit der Autobahn BAB 5 zwischen Karlsruhe und Hamburg ist **die bevorzugte eWay-Strecke** gefunden, nach den Erkenntnissen aus Kapitel 6 in Verbindung mit dem großen Hub-Kreuz um Bad Hersfeld. Ein Vorzugsmodell würde auf dieser Strecke den **Traktionsverkehr** beinhalten und **HVO100** berücksichtigen. Denn nach Bothe (2018, S 22) darf nicht der schlechtere Wirkungsgrad des synthetischen Treibstoffs den Ausschlag geben, sondern die Systemkosten müssten als „entscheidendes Kriterium“ herangezogen werden, und die seien wegen Wegfall der Infrastrukturkosten für den eWay als durchaus positiv zu beurteilen. Für den Traktionsverkehr sprechen aber auch weiche Faktoren, wie in Bioly und Klumpp (2014) beschrieben. Der nicht nur dort beklagte Fahrer-mangel könnte durch Traktionsverkehr zwar nicht aufgehoben, doch in Teilen gemindert werden, weil im Traktionsverkehr ausschließlich Nahverkehrsfahrer gebraucht werden. Dies ist heute ein wichtiges Entscheidungskriterium, vor allem für deutsche Fahrer.

Trotz dieser positiven Bewertung scheint das Eintreten des in der Fallstudie beschriebenen Szenarios unwahrscheinlich. Was in Göckeler, Haase et al. (2022, S 34) als Ergebnis einer Befragung prognostiziert wird, scheint wahrscheinlicher: „Die geringste Marktverfügbarkeit im Jahr 2030 wird dem Oberleitungs-LKW beigemessen. Über die Hälfte der Befragten geht davon aus, dass Oberleitungs-LKW bis 2030 vom Markt verschwunden sein werden“. Denn tatsächlich sind Ende 2024 keine Anzeichen dafür zu erkennen, dass der eHighway das Vorzugsmodell der Zukunft sein wird oder zumindest ein Teil der Lösung. Der Norddeutsche Rundfunk berichtet am 23.12. über das Ende des Testversuchs auf der A1. Die Teststrecke ELISA wurde zwar in Richtung Süden erweitert, die diskutierte Verlängerung bis zur Schweizer Grenze aber abgesagt. Die euphorischen Äußerungen aus dem Verkehrsministerium Baden-Württembergs sind verstummt (siehe Abb. A.6 im Anhang). Auf dem eWayBW auf der B462 bei Rastatt wird Ende 2024 der Testbetrieb eingestellt und im 2. Quartal 2025 soll der Abbau der Infrastruktur erfolgen. Im angrenzenden Ausland scheinen, wie in Abschnitt 2.4.6 ausgeführt, Pläne zur Errichtung von eWay-Trassen fortgeführt zu werden. Da diese teilweise Richtung Deutschland führen, wären positive Signale von dort hilfreich für den Entschluss zur Realisierung solcher Strecken.

In Deutschland scheinen die LKW-Hersteller für die nächsten Jahre auf den batteriegetriebenen LKW als praktikablen Weg zur Dekarbonisierung des Güterkraftverkehrs zu setzen. Brennstoffzellen-LKW gibt es allenfalls als Prototypen, siehe Abb. A.6, und deren Reichweitenvorteil wird durch immer leistungsfähigere Elektro-LKW immer weniger bedeutend. Der E-Actros 600 von Daimler Truck, der neben den HO-Lastwagen auf dem eWayBW als Testfahrzeug läuft, schafft nach Aussagen des Spediteurs auch unter voller Beladung die versprochenen 500 km mit einer Batterieladung. Neben weiteren Anbietern wie z.B. Scania, MAN, DAF, IVECO und Volvo Trucks drängt auch Ford mit einer fernverkehrstauglichen E-Sattelzugmaschine auf den deutschen Markt und mit Steyr aus Österreich kommt seit September 2024 ein komplett neuer Anbieter hinzu. Der eTopas 600 von Steyr verspricht in Abb. A.8 im Anhang ähnliche Werte wie der eActros 600, setzt auf die gleichen Batteriekomponenten aus China und soll in 38 Minuten die Batterie von 20% auf 80% aufladen können.

Am 03.10.2024 bestätigt der Baden-Württembergische Verkehrsminister Hermann auf einer Veranstaltung am Unimog-Museum in Gaggenau das Ende des eWayBW und dessen Abbau im Frühjahr 2025 und stellt fest: „Der Bund hat dafür kein Geld“. So kann es gut sein, dass es zum Verschwinden der Oberleitungs-LKW bis ins Jahr 2030 nicht kommen kann, weil diese erst gar nicht in Dienst gestellt worden sind.

A **Anhang**

Die Ablage im Anhang erfolgte meistens aufgrund der Größe der Dateien, teilweise weil diese zum Verständnis innerhalb der Abschnitte nicht unbedingt erforderlich sind, aber bei Bedarf Erklärung liefern können.

A.1 Transportlisten

Die in diesen Listen aufgeführten Transporte bilden die Basis für die Berechnungen im Abschnitt 2.5.6. Sie sind unterteilt in die 831 Touren mit gleichmäßiger Verteilung über das deutsche PLZ-Gebiet und in die 135 Touren der Spediteure

A.1.1 Transportliste (stochastisch)

Transporte mit gleichmäßiger Verteilung über die Fläche, unterteilt nach Postleitzahlengebiet.

Transportliste

Aus jedem 2-stelligen PLZ-Gebiet werden 3 Abgangsorte beliebig ausgewählt.

Von jedem dieser Abgangsorte gehen 3 Transporte ab, jeder in ein anderes Entfernungsgebiet

Internetadresse für PLZ-Karte: PLZ-Suche. Org

Nr.	Entfernungszone	PLZ-Gebiet	PLZ	Abgangsort	PLZ	Empfangsort	km
1	50 - 200 km	10	10115	Berlin	17033	Neubrandenburg	183
2	201 - 500 km	12	12203	Berlin	30159	Hannover	290
3	>5 00 km	13	13347	Berlin	79098	Freiburg	810
4	50 - 200 km	14	14467	Potsdam	03491	Wittenberg	80
5	201 - 500 km	14	14467	Potsdam	28199	Bremen	364
6	>5 00 km	14	14467	Potsdam	66111	Saarbrücken	706
7	50 - 200 km	14	14641	Nauen	16831	Rheinsberg	77
8	201 - 500 km	14	14641	Nauen	26721	Emden	497
9	>5 00 km	14	14641	Nauen	87435	Kempten	692
10	50 - 200 km	14	14913	Jüterbog	39340	Haldensleben	176
11	201 - 500 km	14	14913	Jüterbog	31785	Hameln	246
12	>5 00 km	14	14913	Jüterbog	76131	Karlsruhe	627
13	50 - 200 km	15	15230	Frankfurt / Oder	02826	Görlitz	178
14	201 - 500 km	15	15230	Frankfurt / Oder	99867	Gotha	385
15	>5 00 km	15	15230	Frankfurt / Oder	49716	Meppen	597
16	50 - 200 km	15	15517	Fürstenwalde	39291	Genthin	167
17	201 - 500 km	15	15517	Fürstenwalde	29664	Walsrode	430
18	>5 00 km	15	15517	Fürstenwalde	54290	Trier	764
19	50 - 200 km	15	15711	Königs Wusterhausen	14547	Beelitz	55
20	201 - 500 km	15	15711	Königs Wusterhausen	98527	Suhl	363
21	>5 00 km	15	15711	Königs Wusterhausen	72760	Reutlingen	684
22	50 - 200 km	16	16225	Eberswalde	17389	Anklam	142
23	201 - 500 km	16	16225	Eberswalde	95632	Wunsiedel	463
24	>5 00 km	16	16225	Eberswalde	76593	Gernsbach	796
25	50 - 200 km	16	16303	Schwedt	10115	Berlin	106
26	201 - 500 km	16	16303	Schwedt	07743	Jena	388
27	>5 00 km	16	16303	Schwedt	56168	Koblenz	778
28	50 - 200 km	16	16515	Oranienburg	16928	Pritzwalk	106
29	201 - 500 km	16	16515	Oranienburg	26382	Wilhelmshaven	474
30	>5 00 km	16	16515	Oranienburg	66953	Pirmasens	732
31	50 - 200 km	17	17033	Neubrandenburg	18246	Bützow	103
32	201 - 500 km	17	17033	Neubrandenburg	06108	Halle/Saale	301
33	>5 00 km	17	17033	Neubrandenburg	88630	Pfullendorf	840
34	50 - 200 km	17	17192	Waren	19348	Perleberg	87
35	201 - 500 km	17	17192	Waren	15907	Lübben	256
36	>5 00 km	17	17192	Waren	72070	Tübingen	795
37	50 - 200 km	17	17489	Greifswald	23966	Wismar	145
38	201 - 500 km	17	17489	Greifswald	49074	Osnabrück	488
39	>5 00 km	17	17498	Greifswald	66663	Merzig	905
40	50 - 200 km	18	18055	Rostock	16909	Wittstock/Dosse	125
41	201 - 500 km	18	18055	Rostock	34117	Kassel	486
42	>5 00 km	18	18055	Rostock	85521	Ottobrunn	796
43	50 - 200 km	18	18311	Ribnitz-Damgarten	19089	Crivitz	141
44	201 - 500 km	18	18311	Ribnitz-Damgarten	38640	Goslar	365
45	>5 00 km	18	18311	Ribnitz-Damgarten	70173	Stuttgart	854
46	50 - 200 km	18	18435	Stralsund	23992	Neukloster	136
47	201 - 500 km	18	18435	Stralsund	39104	Magdeburg	413
48	>5 00 km	18	18435	Stralsund	46483	Wesel	627

Nr.	Entfernungszone	PLZ-Gebiet	PLZ	Abgangsort	PLZ	Empfangsort	km
49	50 - 200 km	19	19053	Schwerin	29614	Soltau	179
50	201 - 500 km	19	19053	Schwerin	34537	Bad Wildungen	456
51	>5 00 km	19	19053	Schwerin	77652	Offenburg	802
52	50 - 200 km	19	19230	Hagenow	29664	Walsrode	180
53	201 - 500 km	19	19230	Hagenow	36304	Alsfeld	475
54	>5 00 km	19	19230	Hagenow	94032	Passau	789
55	50 - 200 km	19	19370	Parchim	16816	Neuruppin	96
56	201 - 500 km	19	19370	Parchim	96317	Kronach	475
57	>5 00 km	19	19370	Parchim	82377	Penzberg	764
58	50 - 200 km	20	20095	Hamburg	24211	Preetz	110
59	201 - 500 km	20	20095	Hamburg	26789	Leer (Ostfriesland)	233
60	>5 00 km	20	20095	Hamburg	68161	Mannheim	572
61	50 - 200 km	20	20149	Hamburg	19230	Hagenow	89
62	201 - 500 km	20	20149	Hamburg	6766	Bitterfeld-Wolfen	368
63	>5 00 km	20	20149	Hamburg	83278	Traunstein	904
64	50 - 200 km	20	20539	Hamburg	26122	Oldenburg	165
65	201 - 500 km	20	20539	Hamburg	52441	Linnich	458
66	>5 00 km	20	20539	Hamburg	76530	Baden-Baden	659
67	50 - 200 km	21	21706	Drochtersen	24837	Schleswig	112
68	201 - 500 km	21	21706	Drochtersen	14943	Luckenwalde	411
69	>5 00 km	21	21706	Drochtersen	93437	Furth im Wald	764
70	50 - 200 km	21	21218	Seevetal	39638	Gardelegen	163
71	201 - 500 km	21	21218	Seevetal	99423	Weimar	402
72	>5 00 km	21	21218	Seevetal	66687	Wadern	624
73	50 - 200 km	21	21335	Lüneburg	29410	Salzwedel	81
74	201 - 500 km	21	21335	Lüneburg	7318	Saalfeld	414
75	>5 00 km	21	21335	Lüneburg	87527	Sonthofen	777
76	50 - 200 km	22	22846	Norderstedt	23909	Bargtheide	66
77	201 - 500 km	22	22846	Norderstedt	49716	Meppen	254
78	>5 00 km	22	22846	Norderstedt	76829	Landau	643
79	50 - 200 km	22	22926	Ahrensburg	29336	Nienhagen	154
80	201 - 500 km	22	22926	Ahrensburg	3238	Finsterwalde	400
81	>5 00 km	22	22926	Ahrensburg	86720	Nördlingen	669
82	50 - 200 km	22	22041	Wandsbek	24119	Kronshagen	101
83	201 - 500 km	22	22041	Wandsbek	49811	Lingen an der Ems	247
84	>5 00 km	22	22041	Wandsbek	93426	Roding	701
85	50 - 200 km	23	23701	Eutin	24214	Gettorf	63
86	201 - 500 km	23	23701	Eutin	48282	Emsdetten	361
87	>5 00 km	23	23701	Eutin	74653	Künzelsau	683
88	50 - 200 km	23	23966	Wismar	16866	Kyritz	160
89	201 - 500 km	23	23966	Wismar	1877	Bischofswerda	470
90	>5 00 km	23	23966	Wismar	54516	Wittlich	707
91	50 - 200 km	23	23843	Bad Oldesloe	27419	Sittensen	100
92	201 - 500 km	23	23843	Bad Oldesloe	26409	Wittmund	272
93	>5 00 km	23	23843	Bad Oldesloe	91438	Bad Windsheim	603
94	50 - 200 km	24	24937	Flensburg	24768	Rendsburg	65
95	201 - 500 km	24	24937	Flensburg	27432	Bremervörde	236
96	>5 00 km	24	24937	Flensburg	95326	Kulmbach	727
97	50 - 200 km	24	24103	Kiel	23936	Grevesmühlen	129
98	201 - 500 km	24	24103	Kiel	19370	Parchim	221
99	>5 00 km	24	24103	Kiel	97762	Hammelburg	566
100	50 - 200 km	24	24534	Neumünster	21682	Stade	115
101	201 - 500 km	24	24534	Neumünster	6406	Bernburg	386
102	>5 00 km	24	24534	Neumünster	91126	Schwabach	720
103	50 - 200 km	25	25813	Husum	21775	Odishheim	155
104	201 - 500 km	25	25813	Husum	14641	Nauen	397
105	>5 00 km	25	25813	Husum	97440	Werneck	628
106	50 - 200 km	25	25746	Heide	23909	Ratzeburg	158
107	201 - 500 km	25	25746	Heide	15344	Strausberg	417
108	>5 00 km	25	25746	Heide	57299	Burbach	545
109	50 - 200 km	25	25524	Itzehoe	29614	Soltau	133
110	201 - 500 km	25	25524	Itzehoe	48691	Vreden	385
111	>5 00 km	25	25524	Itzehoe	9385	Lugau	556

Nr.	Entfernungszone	PLZ-Gebiet	PLZ	Abgangsort	PLZ	Empfangsort	km
112	50 - 200 km	26	26382	Wilhelmshaven	49733	Haren	126
113	201 - 500 km	26	26382	Wilhelmshaven	16816	Neuruppin	430
114	>5 00 km	26	26382	Wilhelmshaven	91710	Gunzenhausen	647
115	50 - 200 km	26	26721	Emden	27612	Loxstedt	126
116	201 - 500 km	26	26721	Emden	14827	Müritzdorf	450
117	>5 00 km	26	26721	Emden	95111	Rehau	630
118	50 - 200 km	26	26655	Westerstede	49074	Osnabrück	133
119	201 - 500 km	26	26655	Westerstede	52349	Düren	372
120	>5 00 km	26	26655	Westerstede	95100	Selb	600
121	50 - 200 km	27	27472	Cuxhaven	21218	Seevetal	124
122	201 - 500 km	27	27472	Cuxhaven	17033	Neubrandenburg	380
123	>5 00 km	27	27472	Cuxhaven	95632	Wunsiedel	622
124	50 - 200 km	27	27404	Zeven	25746	Heide	170
125	201 - 500 km	27	27404	Zeven	17139	Malchin	310
126	>5 00 km	27	27404	Zeven	2763	Zittau	590
127	50 - 200 km	27	27239	Twistringen	31134	Hildesheim	144
128	201 - 500 km	27	27239	Twistringen	4808	Wurzen	382
129	>5 00 km	27	27239	Twistringen	77855	Achern	619
130	50 - 200 km	28	28195	Bremen	29221	Celle	113
131	201 - 500 km	28	28195	Bremen	6502	Thale	256
132	>5 00 km	28	28195	Bremen	91301	Forchheim	547
133	50 - 200 km	28	28876	Oyten	26316	Varel	94
134	201 - 500 km	28	28876	Oyten	17358	Torgelow	431
135	>5 00 km	28	28876	Oyten	89250	Senden	656
136	50 - 200 km	28	28844	Weyhe	25541	Brunsbüttel	198
137	201 - 500 km	28	28844	Weyhe	18528	Bergen auf Rügen	418
138	>5 00 km	28	28844	Weyhe	86551	Aichach	742
139	50 - 200 km	29	29410	Salzwedel	16909	Wittstock/Dosse	116
140	201 - 500 km	29	29410	Salzwedel	24955	Harrislee	301
141	>5 00 km	29	29410	Salzwedel	54634	Bitburg	562
142	50 - 200 km	29	29525	Uelzen	22846	Norderstedt	116
143	201 - 500 km	29	29525	Uelzen	15907	Lübben(Spreewald)	344
144	>5 00 km	29	29525	Uelzen	94209	Regen	624
145	50 - 200 km	29	29664	Walsrode	49661	Cloppenburg	123
146	201 - 500 km	29	29664	Walsrode	46395	Bocholt	308
147	>5 00 km	29	29664	Walsrode	92709	Moosbach	558
148	50 - 200 km	30	30916	Isernhagen	38518	Gifhorn	54
149	201 - 500 km	30	30916	Isernhagen	4860	Torgau	300
150	>5 00 km	30	30916	Isernhagen	76437	Rastatt	509
151	50 - 200 km	30	30823	Garbsen	39340	Haldensleben	140
152	201 - 500 km	30	30823	Garbsen	8209	Auerbach/Vogtl.	416
153	>5 00 km	30	30823	Garbsen	72525	Münsingen	611
154	50 - 200 km	30	30982	Pattensen	49356	Diepholz	127
155	201 - 500 km	30	30982	Pattensen	23936	Grevesmühlen	268
156	>5 00 km	30	30982	Pattensen	94227	Zwiesel	633
157	50 - 200 km	31	31582	Nienburg	38165	Lehre	117
158	201 - 500 km	31	31582	Nienburg	23777	Heringsdorf	265
159	>5 00 km	31	31582	Nienburg	66953	Pirmasens	554
160	50 - 200 km	31	31134	Hildesheim	38364	Schöningen	90
161	201 - 500 km	31	31134	Hildesheim	9599	Freiberg	325
162	>5 00 km	31	31134	Hildesheim	86343	Königsbrunn	583
163	50 - 200 km	31	38100	Braunschweig	32756	Detmold	165
164	201 - 500 km	31	38100	Braunschweig	26340	Zetel	257
165	>5 00 km	31	38100	Braunschweig	86529	Schrobenhausen	560
166	50 - 200 km	32	32423	Minden	31582	Nienburg/Weser	62
167	201 - 500 km	32	32423	Minden	16515	Oranienburg	366
168	>5 00 km	32	32423	Minden	18546	Sassnitz	530
169	50 - 200 km	32	32052	Herford	33442	Herzebrock-Clarholz	52
170	201 - 500 km	32	32052	Herford	1587	Riesa	423
171	>5 00 km	32	32052	Herford	84347	Pfarrkirchen	650
172	50 - 200 km	32	32756	Detmold	37574	Einbeck	86
173	201 - 500 km	32	32756	Detmold	23795	Bad Segeberg	299
174	>5 00 km	32	32756	Detmold	16303	Schwedt/Oder	502
175	50 - 200 km	33	33604	Bielefeld	48329	Havixbeck	118
176	201 - 500 km	33	33604	Bielefeld	19288	Ludwigslust	362
177	>5 00 km	33	33604	Bielefeld	2826	Görlitz	575
178	50 - 200 km	33	33034	Brakel	59602	Rüthen	75
179	201 - 500 km	33	33034	Brakel	18246	Bützow	432
180	>5 00 km	33	33034	Brakel	94474	Vilshofen an der Donau	572

Nr.	Entfernungszone	PLZ-Gebiet	PLZ	Abgangsort	PLZ	Empfangsort	km
181	50 - 200 km	33	33142	Büren	57319	Bad Berleburg	79
182	201 - 500 km	33	33142	Büren	66440	Blieskastel	388
183	>5 00 km	33	33142	Büren	86956	Schongau	593
184	50 - 200 km	34	34414	Warburg	59269	Beckum	105
185	201 - 500 km	34	34414	Warburg	39387	Oschersleben	254
186	>5 00 km	34	34414	Warburg	16278	Angermünde	520
187	50 - 200 km	34	34125	Kassel	99817	Eisenach	87
188	201 - 500 km	34	34125	Kassel	35956	Goldbeck	308
189	>5 00 km	34	34125	Kassel	17373	Ueckermünde	550
190	50 - 200 km	34	34613	Schwalmstadt	97688	Bad Kissingen	135
191	201 - 500 km	34	34613	Schwalmstadt	4610	Meuselwitz	268
192	>5 00 km	34	34613	Schwalmstadt	94060	Pocking	514
193	50 - 200 km	35	35066	Frankenberg	59872	Meschede	65
194	201 - 500 km	35	35066	Frankenberg	39104	Magdeburg	315
195	>5 00 km	35	35066	Frankenberg	83052	Bruckmühl	538
196	50 - 200 km	35	35037	Marburg	36341	Lauterbach	62
197	201 - 500 km	35	35037	Marburg	8371	Glauchau	307
198	>5 00 km	35	35037	Marburg	17291	Prenzlau	599
199	50 - 200 km	35	35576	Wetzlar	65510	Idstein	73
200	201 - 500 km	35	35576	Wetzlar	48599	Gronau	266
201	>5 00 km	35	35576	Wetzlar	16306	Golm	607
202	50 - 200 km	36	36179	Bebra	99880	Waltershausen	73
203	201 - 500 km	36	36179	Bebra	39606	Meseberg	277
204	>5 00 km	36	36179	Bebra	25899	Dagebüll	543
205	50 - 200 km	36	36037	Fulda	63667	Nidda	65
206	201 - 500 km	36	36037	Fulda	6484	Quedlinburg	279
207	>5 00 km	36	36037	Fulda	18029	Bad Doberan	568
208	50 - 200 km	36	36381	Schlüchtern	97688	Bad Kissingen	74
209	201 - 500 km	36	36381	Schlüchtern	92637	Weiden	282
210	>5 00 km	36	36381	Schlüchtern	17389	Anklam	659
211	50 - 200 km	37	37603	Holzminde	99084	Erfurt	196
212	201 - 500 km	37	37603	Holzminde	39218	Schönebeck	232
213	>5 00 km	37	37603	Holzminde	83435	Bad Reichenhall	702
214	50 - 200 km	37	37073	Göttingen	99759	Sollstedt	64
215	201 - 500 km	37	37073	Göttingen	74532	Ilshofen	349
216	>5 00 km	37	37073	Göttingen	79761	Waldshut-Tiengen	586
217	50 - 200 km	37	37269	Eschwege	99084	Erfurt	90
218	201 - 500 km	37	37269	Eschwege	17192	Waren	434
219	>5 00 km	37	37269	Eschwege	82481	Mittenwald	555
220	50 - 200 km	38	38440	Wolfsburg	39104	Magdeburg	90
221	201 - 500 km	38	38440	Wolfsburg	16515	Oranienburg	240
222	>5 00 km	38	38440	Wolfsburg	93413	Cham	504
223	50 - 200 km	38	38226	Salzgitter	31303	Burgdorf	79
224	201 - 500 km	38	38226	Salzgitter	90402	Nürnberg	437
225	>5 00 km	38	38226	Salzgitter	84048	Mainburg	559
226	50 - 200 km	38	38889	Blankenburg	6526	Sangerhausen	84
227	201 - 500 km	38	38889	Blankenburg	25718	Friedrichscoog	378
228	>5 00 km	38	38889	Blankenburg	9526	Olbernhau	538
229	50 - 200 km	39	39576	Stendal	14806	Bad Belzig	88
230	201 - 500 km	39	39576	Stendal	17389	Anklam	265
231	>5 00 km	39	39576	Stendal	54595	Prüm	595
232	50 - 200 km	39	39638	Gardelegen	29479	Jameln	68
233	201 - 500 km	39	39638	Gardelegen	49393	Lohne	258
234	>5 00 km	39	39638	Gardelegen	76887	Bad Bergzabern	557
235	50 - 200 km	39	39104	Magdeburg	6886	Lutherstadt	87
236	201 - 500 km	39	39104	Magdeburg	17309	Brietzig	299
237	>5 00 km	39	39104	Magdeburg	84503	Altötting	559
238	50 - 200 km	40	40667	Meerbusch	47574	Goch	70
239	201 - 500 km	40	40667	Meerbusch	37213	Witzenhausen	283
240	>5 00 km	40	40667	Meerbusch	87719	Mindelheim	579
241	50 - 200 km	40	40217	Düsseldorf	48703	Stadtlohn	110
242	201 - 500 km	40	40217	Düsseldorf	30159	Hannover	282
243	>5 00 km	40	40217	Düsseldorf	17291	Prenzlau	701

Nr.	Entfernungszone	PLZ-Gebiet	PLZ	Abgangsort	PLZ	Empfangsort	km
244	50 - 200 km	40	40764	Langenfeld	52156	Monschau	121
245	201 - 500 km	40	40764	Langenfeld	97762	Hammelburg	313
246	>5 00 km	40	40764	Langenfeld	87629	Füssen	595
247	50 - 200 km	41	41747	Viersen	50374	Erfstadt	71
248	201 - 500 km	41	41747	Viersen	6333	Hettstedt	450
249	>5 00 km	41	41747	Viersen	83308	Trostberg	735
250	50 - 200 km	41	41061	Mönchengladbach	46483	Wesel	73
251	201 - 500 km	41	41061	Mönchengladbach	21614	Buxtehude	402
252	>5 00 km	41	41061	Mönchengladbach	15230	Frankfurt (Oder)	664
253	50 - 200 km	41	41539	Dormagen	53819	Seelscheid	67
254	201 - 500 km	41	41539	Dormagen	74722	Buchen	319
255	>5 00 km	41	41539	Dormagen	1917	Kamen	635
256	50 - 200 km	42	42549	Velbert	59821	Arnsberg	109
257	201 - 500 km	42	42549	Velbert	39340	Haldensleben	395
258	>5 00 km	42	42549	Velbert	18356	Barth	620
259	50 - 200 km	42	42275	Wuppertal	59872	Meschede	103
260	201 - 500 km	42	42275	Wuppertal	97941	Tauberbischofsheim	340
261	>5 00 km	42	42275	Wuppertal	88299	Leutkirch	572
262	50 - 200 km	42	42651	Solingen	53783	Eitorf	77
263	201 - 500 km	42	42651	Solingen	29308	Winsen (Aller)	299
264	>5 00 km	42	42651	Solingen	17153	Stavenghagen	640
265	50 - 200 km	44	44137	Dortmund	59269	Beckum	60
266	201 - 500 km	44	44137	Dortmund	4600	Altenburg	418
267	>5 00 km	44	44137	Dortmund	18273	Güstrow	534
268	50 - 200 km	44	44623	Herne	48301	Nottuln	58
269	201 - 500 km	44	44623	Herne	99610	Sömmerda	349
270	>5 00 km	44	44623	Herne	15344	Strausberg	557
271	50 - 200 km	44	44787	Bochum	59227	Ahlen	82
272	201 - 500 km	44	44787	Bochum	97440	Werneck	366
273	>5 00 km	44	44787	Bochum	83052	Bruckmühl	668
274	50 - 200 km	45	45721	Haltern	59514	Wewer	80
275	201 - 500 km	45	45721	Haltern	25421	Pinneberg	332
276	>5 00 km	45	45721	Haltern	16259	Bad Freienwalde	586
277	50 - 200 km	45	45657	Recklinghausen	48565	Steinfurt	89
278	201 - 500 km	45	45657	Recklinghausen	29633	Münster	316
279	>5 00 km	45	45657	Recklinghausen	88178	Heimenkirch	649
280	50 - 200 km	45	45879	Gelsenkirchen	45879	Bocholt	67
281	201 - 500 km	45	45879	Gelsenkirchen	66482	Zweibrücken	352
282	>5 00 km	45	45879	Gelsenkirchen	85368	Moosburg	637
283	50 - 200 km	46	46446	Emmerich	48683	Ahaus	88
284	201 - 500 km	46	46446	Emmerich	38364	Schöningen	416
285	>5 00 km	46	46446	Emmerich	2977	Hoyersverda	724
286	50 - 200 km	46	46483	Wesel	41460	Neuss	67
287	201 - 500 km	46	46483	Wesel	55116	Mainz	294
288	>5 00 km	46	46483	Wesel	72488	Sigmaringen	557
289	50 - 200 km	46	46282	Dorsten	48143	Münster	66
290	201 - 500 km	46	46282	Dorsten	7407	Rudolstadt	408
291	>5 00 km	46	46282	Dorsten	9111	Chemnitz	513
292	50 - 200 km	47	47533	Kleve	46514	Schermbeck	69
293	201 - 500 km	47	47533	Kleve	98646	Hildburghausen	483
294	>5 00 km	47	47533	Kleve	15890	Eisenhüttenstadt	695
295	50 - 200 km	47	47441	Moers	58239	Schwerte	82
296	201 - 500 km	47	47441	Moers	91555	Feuchtwangen	452
297	>5 00 km	47	47441	Moers	88074	Meckenbeuren	616
298	50 - 200 km	47	47798	Krefeld	51373	Leverkusen	61
299	201 - 500 km	47	47798	Krefeld	25462	Rellingen	411
300	>5 00 km	47	47798	Krefeld	2625	Bautzen	649
301	50 - 200 km	48	48529	Nordhorn	49565	Bramsche	95
302	201 - 500 km	48	48529	Nordhorn	6917	Jessen	465
303	>5 00 km	48	48529	Nordhorn	94315	Straubing	692

Nr.	Entfernungszone	PLZ-Gebiet	PLZ	Abgangsort	PLZ	Empfangsort	km
304	50 - 200 km	48	48143	Münster	33604	Bielefeld	110
305	201 - 500 km	48	48143	Münster	74731	Walldüren	368
306	>5 00 km	48	48143	Münster	16792	Zehdenick	517
307	50 - 200 km	48	48734	Reken	59872	Meschede	142
308	201 - 500 km	48	48734	Reken	64283	Darmstadt	310
309	>5 00 km	48	48734	Reken	72393	Burladingen	543
310	50 - 200 km	49	49661	Cloppenburg	26340	Zetel	84
311	201 - 500 km	49	49661	Cloppenburg	39576	Stendal	361
312	>5 00 km	49	49661	Cloppenburg	93133	Burglengenfeld	650
313	50 - 200 km	49	49808	Lingen	26871	Papenburg	71
314	201 - 500 km	49	49808	Lingen	25813	Husum	381
315	>5 00 km	49	49808	Lingen	3046	Cottbus	588
316	50 - 200 km	49	49074	Osnabrück	31582	Nienburg/Weser	107
317	201 - 500 km	49	49074	Osnabrück	97688	Bad Kissingen	328
318	>5 00 km	49	49074	Osnabrück	87719	Mindelheim	626
319	50 - 200 km	50	50181	Bedburg	47051	Duisburg	66
320	201 - 500 km	50	50181	Bedburg	76448	Durmersheim	327
321	>5 00 km	50	50181	Bedburg	94051	Hauzenberg	680
322	50 - 200 km	50	50668	Köln	51643	Gummersbach	61
323	201 - 500 km	50	50668	Köln	38440	Wolfsburg	384
324	>5 00 km	50	50668	Köln	17309	Pasewalk	723
325	50 - 200 km	50	50374	Erfstadt	57518	Betzdorf	134
326	201 - 500 km	50	50374	Erfstadt	74613	Öhringen	325
327	>5 00 km	50	50374	Erfstadt	94469	Deggendorf	594
328	50 - 200 km	51	51688	Wipperfürth	57368	Lennestadt	63
329	201 - 500 km	51	51688	Wipperfürth	96450	Coburg	369
330	>5 00 km	51	51688	Wipperfürth	14943	Luckenwalde	528
331	50 - 200 km	51	51643	Gummersbach	35216	Biedenkopf	111
332	201 - 500 km	51	51643	Gummersbach	26789	Leer	331
333	>5 00 km	51	51643	Gummersbach	23936	Grevesmühlen	517
334	50 - 200 km	51	51545	Waldbröl	35683	Dillenburg	78
335	201 - 500 km	51	51545	Waldbröl	29525	Uelzen	402
336	>5 00 km	51	51545	Waldbröl	17109	Demmin	684
337	50 - 200 km	52	52525	Heinsberg	56727	Mayen	150
338	201 - 500 km	52	52525	Heinsberg	74072	Heilbronn	379
339	>5 00 km	52	52525	Heinsberg	87629	Füssen	641
340	50 - 200 km	52	52062	Aachen	56626	Andernach	142
341	201 - 500 km	52	52062	Aachen	76131	Karlsruhe	349
342	>5 00 km	52	52062	Aachen	8340	Schwarzenberg	595
343	50 - 200 km	52	52349	Düren	53783	Eltorf	94
344	201 - 500 km	52	52349	Düren	32423	Minden	281
345	>5 00 km	52	52349	Düren	18055	Rostock	653
346	50 - 200 km	53	53113	Bonn	57250	Netphen	105
347	201 - 500 km	53	53113	Bonn	96047	Bamberg	365
348	>5 00 km	53	53113	Bonn	23714	Malente	558
349	50 - 200 km	53	53879	Euskirchen	56564	Neuwied	81
350	201 - 500 km	53	53879	Euskirchen	99734	Nordhausen	397
351	>5 00 km	53	53879	Euskirchen	84307	Edggenfelden	625
352	50 - 200 km	53	53937	Schleiden	50668	Köln	72
353	201 - 500 km	53	53937	Schleiden	97070	Würzburg	342
354	>5 00 km	53	53937	Schleiden	14471	Potsdam	610
355	50 - 200 km	54	54634	Bitburg	66693	Mettlach	89
356	201 - 500 km	54	54634	Bitburg	33604	Bielefeld	331
357	>5 00 km	54	54634	Bitburg	24103	Kiel	648
358	50 - 200 km	54	54516	Wittlich	56154	Boppard	112
359	201 - 500 km	54	54516	Wittlich	86150	Augsburg	458
360	>5 00 km	54	54516	Wittlich	1067	Dresden	602
361	50 - 200 km	54	54290	Trier	55743	Idar-Oberstein	63
362	201 - 500 km	54	54290	Trier	32105	Bad Salzuflen	389
363	>5 00 km	54	54290	Trier	19055	Schwerin	718
364	50 - 200 km	55	55743	Idar-Oberstein	55116	Mainz	95
365	201 - 500 km	55	55743	Idar-Oberstein	93086	Wörth an der Donau	478
366	>5 00 km	55	55743	Idar-Oberstein	4924	Bad Liebenwerda	595

Nr.	Entfernungszone	PLZ-Gebiet	PLZ	Abgangsort	PLZ	Empfangsort	km
367	50 - 200 km	55	55543	Bad Kreuznach	67655	Kaiserslautern	78
368	201 - 500 km	55	55543	Bad Kreuznach	79098	Freiburg	272
369	>5 00 km	55	55543	Bad Kreuznach	14471	Potsdam	596
370	50 - 200 km	55	55232	Alzey	65549	Limburg	103
371	201 - 500 km	55	55232	Alzey	30823	Garbsen	434
372	>5 00 km	55	55232	Alzey	14913	Jüterbog	571
373	50 - 200 km	56	56457	Westerburg	36304	Alsfeld	117
374	201 - 500 km	56	56457	Westerburg	27749	Delmenhorst	358
375	>5 00 km	56	56457	Westerburg	19055	Schwerin	589
376	50 - 200 km	56	56068	Koblenz	35578	Wetzlar	94
377	201 - 500 km	56	56068	Koblenz	32312	Lübbecke	335
378	>5 00 km	56	56068	Koblenz	16259	Bad Freienwalde	690
379	50 - 200 km	56	56812	Cochem	55411	Bingen	97
380	201 - 500 km	56	56812	Cochem	49624	Löningen	378
381	>5 00 km	56	56812	Cochem	80331	München	519
382	50 - 200 km	57	57392	Schmallenberg	34560	Fritzlar	98
383	201 - 500 km	57	57392	Schmallenberg	6366	Köthen (Anhalt)	361
384	>5 00 km	57	57392	Schmallenberg	17235	Neustrelitz	602
385	50 - 200 km	57	57072	Siegen	35037	Marburg	83
386	201 - 500 km	57	57072	Siegen	27383	Scheeßel	368
387	>5 00 km	57	57072	Siegen	15230	Frankfurt (Oder)	645
388	50 - 200 km	57	57518	Betzdorf	35260	Stadtallendorf	117
389	201 - 500 km	57	57518	Betzdorf	95444	Bayreuth	388
390	>5 00 km	57	57518	Betzdorf	18311	Ribnitz	655
391	50 - 200 km	58	58706	Menden	59929	Brilon	70
392	201 - 500 km	58	58706	Menden	99867	Gotha	263
393	>5 00 km	58	58706	Menden	93073	Neutraubling	552
394	50 - 200 km	58	58095	Hagen	59581	Warstein	94
395	201 - 500 km	58	58095	Hagen	72574	Bad Urach	444
396	>5 00 km	58	58095	Hagen	16278	Angermünde	597
397	50 - 200 km	58	58540	Meinerzhagen	59955	Winterberg	84
398	201 - 500 km	58	58540	Meinerzhagen	91710	Gunzenhausen	388
399	>5 00 km	58	58540	Meinerzhagen	84478	Waldkraiburg	614
400	50 - 200 km	59	59302	Oelde	33034	Brakel	94
401	201 - 500 km	59	59302	Oelde	6618	Naumburg	357
402	>5 00 km	59	59302	Oelde	88662	Überlingen	630
403	50 - 200 km	59	59821	Arnsberg	33604	Bielefeld	112
404	201 - 500 km	59	59821	Arnsberg	95326	Kulmbach	428
405	>5 00 km	59	59821	Arnsberg	16515	Oranienburg	503
406	50 - 200 km	59	59939	Olsberg	35216	Biedenkopf	66
407	201 - 500 km	59	59939	Olsberg	74653	Künzelsau	337
408	>5 00 km	59	59939	Olsberg	83059	Kolbemoor	629
409	50 - 200 km	60	60311	Frankfurt	35578	Wetzlar	70
410	201 - 500 km	60	60311	Frankfurt	32369	Rahden	333
411	>5 00 km	60	60311	Frankfurt	17139	Malchin	629
412	50 - 200 km	60	60311	Frankfurt	35390	Gießen	63
413	201 - 500 km	60	60311	Frankfurt	49074	Osnabrück	328
414	>5 00 km	60	60311	Frankfurt	26603	Aurich	504
415	50 - 200 km	60	60311	Frankfurt	63863	Eschau	64
416	201 - 500 km	60	60311	Frankfurt	9376	Oelsnitz	390
417	>5 00 km	60	60311	Frankfurt	17309	Pasewalk	702
418	50 - 200 km	61	61231	Bad Nauheim	57072	Siegen	98
419	201 - 500 km	61	61231	Bad Nauheim	48431	Rheine	291
420	>5 00 km	61	61231	Bad Nauheim	25746	Heide	568
421	50 - 200 km	61	61169	Friedberg	63739	Aschaffenburg	68
422	201 - 500 km	61	61169	Friedberg	91719	Heidenheim	272
423	>5 00 km	61	61169	Friedberg	83471	Berchtesgaden	578
424	50 - 200 km	61	61462	Königstein	65589	Hadamar	53
425	201 - 500 km	61	61462	Königstein	99706	Sondershausen	263
426	>5 00 km	61	61462	Königstein	3130	Spremberg	561
427	50 - 200 km	63	63667	Nidda	36037	Fulda	62
428	201 - 500 km	63	63667	Nidda	95632	Wunsiedel	290
429	>5 00 km	63	63667	Nidda	15806	Zossen	501
430	50 - 200 km	63	63450	Hanau	97877	Wertheim	80
431	201 - 500 km	63	63450	Hanau	39340	Haldensleben	405
432	>5 00 km	63	63450	Hanau	17153	Reuterstadt	632
433	50 - 200 km	63	63739	Aschaffenburg	97922	Lauda-Königshofen	99
434	201 - 500 km	63	63739	Aschaffenburg	4838	Ellenburg	423
435	>5 00 km	63	63739	Aschaffenburg	23683	Scharbeutz	587

Nr.	Entfernungszone	PLZ-Gebiet	PLZ	Abgangsort	PLZ	Empfangsort	km
436	50 - 200 km	64	64283	Darmstadt	56068	Koblenz	135
437	201 - 500 km	64	64283	Darmstadt	37520	Osterode am Harz	306
438	>5 00 km	64	64283	Darmstadt	24937	Flensburg	678
439	50 - 200 km	64	64625	Bensheim	67655	Kaiserslautern	82
440	201 - 500 km	64	64625	Bensheim	46395	Bocholt	328
441	>5 00 km	64	64625	Bensheim	26409	Wittmund	549
442	50 - 200 km	64	64711	Erbach	97753	Karlstadt	102
443	201 - 500 km	64	64711	Erbach	88410	Bad Wurzach	294
444	>5 00 km	64	64711	Erbach	28195	Bremen	522
445	50 - 200 km	65	65589	Hadamar	56727	Mayen	87
446	201 - 500 km	65	65589	Hadamar	78532	Tuttingen	370
447	>5 00 km	65	65589	Hadamar	83435	Bad Reichenhall	608
448	50 - 200 km	65	65510	Idstein	35410	Hungen	104
449	201 - 500 km	65	65510	Idstein	6108	Halle (Saale)	412
450	>5 00 km	65	65510	Idstein	24161	Altenholz	634
451	50 - 200 km	65	65183	Wiesbaden	67305	Ramsen	76
452	201 - 500 km	65	65183	Wiesbaden	34369	Hofgeismar	251
453	>5 00 km	65	65183	Wiesbaden	19288	Ludwigslust	527
454	50 - 200 km	66	66693	Mettlach	54516	Wittlich	82
455	201 - 500 km	66	66693	Mettlach	91710	Gunzenhausen	378
456	>5 00 km	66	66693	Mettlach	14547	Beelitz	717
457	50 - 200 km	66	66111	Saarbrücken	54290	Trier	97
458	201 - 500 km	66	66111	Saarbrücken	87435	Kempten	386
459	>5 00 km	66	66111	Saarbrücken	95659	Arzberg	507
460	50 - 200 km	66	66953	Pirmasens	76131	Karlsruhe	85
461	201 - 500 km	66	66953	Pirmasens	84028	Landshut	424
462	>5 00 km	66	66953	Pirmasens	16761	Hennigsdorf	716
463	50 - 200 km	67	67655	Kaiserslautern	74072	Heilbronn	142
464	201 - 500 km	67	67655	Kaiserslautern	30159	Hannover	459
465	>5 00 km	67	67655	Kaiserslautern	31632	Husum	509
466	50 - 200 km	67	67547	Worms	69483	Wald-Michelbach	55
467	201 - 500 km	67	67547	Worms	37115	Duderstadt	328
468	>5 00 km	67	67547	Worms	18273	Güstrow	659
469	50 - 200 km	67	67346	Speyer	74072	Heilbronn	72
470	201 - 500 km	67	67346	Speyer	37073	Göttingen	331
471	>5 00 km	67	67346	Speyer	27472	Cuxhaven	656
472	50 - 200 km	68	68642	Bürstadt	74072	Heilbronn	106
473	201 - 500 km	68	68642	Bürstadt	79539	Lörrach	285
474	>5 00 km	68	68642	Bürstadt	1067	Dresden	523
475	50 - 200 km	68	68161	Mannheim	75015	Bretten	65
476	201 - 500 km	68	68161	Mannheim	92237	Sulzbach-Rosenberg	283
477	>5 00 km	68	68161	Mannheim	19348	Perleberg	575
478	50 - 200 km	68	68753	Waghäusel	76530	Baden-Baden	79
479	201 - 500 km	68	68753	Waghäusel	47798	Krefeld	334
480	>5 00 km	68	68753	Waghäusel	23966	Wismar	708
481	50 - 200 km	69	69469	Weinheim	97877	Wertheim	152
482	201 - 500 km	69	69469	Weinheim	84347	Pfarrkirchen	442
483	>5 00 km	69	69469	Weinheim	18209	Bad Döberan	720
484	50 - 200 km	69	69117	Heidelberg	74613	Öhringen	94
485	201 - 500 km	69	69117	Heidelberg	8523	Plauen	388
486	>5 00 km	69	69117	Heidelberg	23795	Bad Segeberg	633
487	50 - 200 km	69	69412	Eberbach	64319	Pfungstadt	79
488	201 - 500 km	69	69412	Eberbach	49610	Quakenbrück	473
489	>5 00 km	69	69412	Eberbach	14612	Falkensee	596
490	50 - 200 km	70	70178	Stuttgart	72379	Hechingen	63
491	201 - 500 km	70	70178	Stuttgart	93426	Roding	317
492	>5 00 km	70	70178	Stuttgart	15344	Strausberg	681
493	50 - 200 km	70	70839	Gerlingen	72793	Pfullingen	50
494	201 - 500 km	70	70839	Gerlingen	37073	Göttingen	403
495	>5 00 km	70	70839	Gerlingen	26603	Aurich	672
496	50 - 200 km	70	70806	Kornwestheim	91550	Dinkelsbühl	143
497	201 - 500 km	70	70806	Kornwestheim	95111	Rehau	329
498	>5 00 km	70	70806	Kornwestheim	17438	Wolgast	867

Nr.	Entfernungszone	PLZ-Gebiet	PLZ	Abgangsort	PLZ	Empfangsort	km
499	50 - 200 km	71	71522	Backnang	74906	Bad Rappenau	60
500	201 - 500 km	71	71522	Backnang	6449	Aschersleben	448
501	>5 00 km	71	71522	Backnang	25451	Quickborn	677
502	50 - 200 km	71	71063	Sindelfingen	74072	Heilbronn	68
503	201 - 500 km	71	71063	Sindelfingen	83646	Bad Tölz	281
504	>5 00 km	71	71063	Sindelfingen	21481	Lauenburg (Elbe)	686
505	50 - 200 km	71	71083	Herrenberg	72355	Schömburg	62
506	201 - 500 km	71	71083	Herrenberg	57413	Finnentrop	385
507	>5 00 km	71	71083	Herrenberg	3222	Lübbenau	634
508	50 - 200 km	72	72764	Reutlingen	89584	Ehingen (Donau)	58
509	201 - 500 km	72	72764	Reutlingen	84028	Landshut	266
510	>5 00 km	72	72764	Reutlingen	21493	Schwarzenbek	744
511	50 - 200 km	72	72379	Hechingen	88348	Bad Saulgau	70
512	201 - 500 km	72	72379	Hechingen	99084	Erfurt	419
513	>5 00 km	72	72379	Hechingen	4916	Herzberg (Elster)	624
514	50 - 200 km	72	72488	Sigmaringen	88677	Markdorf	52
515	201 - 500 km	72	72488	Sigmaringen	98646	Hildburghausen	384
516	>5 00 km	72	72488	Sigmaringen	23936	Grevesmühlen	877
517	50 - 200 km	73	73430	Aalen	86609	Donauwörth	65
518	201 - 500 km	73	73430	Aalen	9456	Annaberg-Buchholz	372
519	>5 00 km	73	73430	Aalen	23626	Ratekau	698
520	50 - 200 km	73	73207	Plochingen	89073	Ulm	78
521	201 - 500 km	73	73207	Plochingen	34497	Korbach	373
522	>5 00 km	73	73207	Plochingen	33604	Bielefeld	513
523	50 - 200 km	73	73728	Esslingen	89073	Ulm	85
524	201 - 500 km	73	73728	Esslingen	7545	Gera	415
525	>5 00 km	73	73728	Esslingen	19322	Wittenberge	653
526	50 - 200 km	74	74731	Walldürn	97762	Hammelburg	128
527	201 - 500 km	74	74731	Walldürn	49163	Bohmt	454
528	>5 00 km	74	74731	Walldürn	24306	Plön	656
529	50 - 200 km	74	74564	Crailsheim	91710	Gunzenhausen	69
530	201 - 500 km	74	74564	Crailsheim	83308	Trostberg	318
531	>5 00 km	74	74564	Crailsheim	29614	Soltau	530
532	50 - 200 km	74	74072	Heilbronn	68161	Mannheim	83
533	201 - 500 km	74	74072	Heilbronn	82418	Murnau am Staffelsee	345
534	>5 00 km	74	74072	Heilbronn	21335	Lüneburg	608
535	50 - 200 km	75	75031	Eppingen	71063	Sindelfingen	85
536	201 - 500 km	75	75031	Eppingen	59387	Ascheberg	388
537	>5 00 km	75	75031	Eppingen	25746	Heide	725
538	50 - 200 km	75	75172	Pforzheim	72764	Reutlingen	76
539	201 - 500 km	75	75172	Pforzheim	99423	Weimar	394
540	>5 00 km	75	75172	Pforzheim	18507	Grimmen	880
541	50 - 200 km	75	75365	Calw	78333	Stockach	148
542	201 - 500 km	75	75365	Calw	9111	Chemnitz	460
543	>5 00 km	75	75365	Calw	23611	Bad Schwartau	734
544	50 - 200 km	76	76829	Landau	74653	Künzelsau	144
545	201 - 500 km	76	76829	Landau	33098	Paderborn	357
546	>5 00 km	76	76829	Landau	18273	Güstrow	722
547	50 - 200 km	76	76131	Karlsruhe	67547	Worms	95
548	201 - 500 km	76	76131	Karlsruhe	95213	Münchberg	354
549	>5 00 km	76	76131	Karlsruhe	23879	Möln	668
550	50 - 200 km	76	76593	Gernsbach	77652	Offenburg	72
551	201 - 500 km	76	76593	Gernsbach	95100	Selb	416
552	>5 00 km	76	76593	Gernsbach	25524	Itzehoe	715
553	50 - 200 km	77	77815	Bühl	78052	Villingen-Schwenningen	118
554	201 - 500 km	77	77815	Bühl	99880	Waltershausen	389
555	>5 00 km	77	77815	Bühl	16515	Oranienburg	745
556	50 - 200 km	77	77652	Offenburg	76131	Karlsruhe	79
557	201 - 500 km	77	77652	Offenburg	99610	Sömmerda	489
558	>5 00 km	77	77652	Offenburg	3046	Cottbus	720
559	50 - 200 km	77	77709	Wolfach	72202	Nagold	67
560	201 - 500 km	77	77709	Wolfach	34125	Kassel	440
561	>5 00 km	77	77709	Wolfach	23552	Lübeck	796

Nr.	Entfernungszone	PLZ-Gebiet	PLZ	Abgangsort	PLZ	Empfangsort	km
562	50 - 200 km	78	78713	Schramberg	88662	Überlingen	104
563	201 - 500 km	78	78713	Schramberg	90403	Nürnberg	317
564	>5 00 km	78	78713	Schramberg	29410	Salzwedel	691
565	50 - 200 km	78	78052	Villingen-Schwenningen	72488	Sigmaringen	70
566	201 - 500 km	78	78052	Villingen-Schwenningen	35260	Stadtlendorf	396
567	>5 00 km	78	78052	Villingen-Schwenningen	28195	Bremen	748
568	50 - 200 km	78	78315	Radolfzell	88074	Meckenbeuren	65
569	201 - 500 km	78	78315	Radolfzell	97421	Schweinfurt	356
570	>5 00 km	78	78315	Radolfzell	23909	Ratzeburg	877
571	50 - 200 km	79	79098	Freiburg	78224	Singen	100
572	201 - 500 km	79	79098	Freiburg	36037	Fulda	374
573	>5 00 km	79	79098	Freiburg	23714	Malente	858
574	50 - 200 km	79	79539	Lörrach	79331	Teningen	80
575	201 - 500 km	79	79539	Lörrach	36251	Bad Hersfeld	465
576	>5 00 km	79	79539	Lörrach	26871	Papenburg	768
577	50 - 200 km	79	79761	Waldshut-Tiengen	78462	Konstanz	90
578	201 - 500 km	79	79761	Waldshut-Tiengen	95213	Münchberg	493
579	>5 00 km	79	79761	Waldshut-Tiengen	16928	Pritzwalk	905
580	50 - 200 km	80	80331	München	83022	Rosenheim	73
581	201 - 500 km	80	80331	München	8056	Zwickau	356
582	>5 00 km	80	80331	München	20354	Hamburg	793
583	50 - 200 km	80	80331	München	82377	Penzberg	55
584	201 - 500 km	80	80331	München	34537	Bad Wildungen	478
585	>5 00 km	80	80331	München	26506	Norden	885
586	50 - 200 km	80	80331	München	85276	Pfaffenhofen an der Ilm	53
587	201 - 500 km	80	80331	München	56340	Dachsenhausen	478
588	>5 00 km	80	80331	München	26721	Emden	856
589	50 - 200 km	81	81379	München	83734	Hausham	53
590	201 - 500 km	81	81379	München	34125	Kassel	495
591	>5 00 km	81	81379	München	27612	Loxstedt	821
592	50 - 200 km	81	81379	München	82380	Peißenberg	58
593	201 - 500 km	81	81379	München	36381	Schlüchtern	382
594	>5 00 km	81	81379	München	17192	Waren (Müritz)	727
595	50 - 200 km	81	81379	München	85049	Ingolstadt	88
596	201 - 500 km	81	81379	München	4924	Bad Liebenwerda	493
597	>5 00 km	81	81379	München	48431	Rheine	709
598	50 - 200 km	82	82256	Fürstfeldbruck	83607	Holzkirchen	64
599	201 - 500 km	82	82256	Fürstfeldbruck	77652	Offenburg	343
600	>5 00 km	82	82256	Fürstfeldbruck	39638	Gardelegen	586
601	50 - 200 km	82	82515	Wolfratshausen	83022	Rosenheim	74
602	201 - 500 km	82	82515	Wolfratshausen	36037	Fulda	415
603	>5 00 km	82	82515	Wolfratshausen	26441	Jever	866
604	50 - 200 km	82	82467	Garmisch-Partenkirchen	87616	Marktoberdorf	74
605	201 - 500 km	82	82467	Garmisch-Partenkirchen	8289	Schneeberg	450
606	>5 00 km	82	82467	Garmisch-Partenkirchen	39291	Zeddenick	611
607	50 - 200 km	83	83512	Wasserburg	84307	Eggenfelden	82
608	201 - 500 km	83	83512	Wasserburg	35390	Gießen	500
609	>5 00 km	83	83512	Wasserburg	26632	Ilhove	880
610	50 - 200 km	83	83278	Traunstein	84048	Mainburg	181
611	201 - 500 km	83	83278	Traunstein	7743	Jena	481
612	>5 00 km	83	83278	Traunstein	20354	Hamburg	902
613	50 - 200 km	83	83646	Bad Tölz	83308	Trostberg	99
614	201 - 500 km	83	83646	Bad Tölz	68161	Mannheim	404
615	>5 00 km	83	83646	Bad Tölz	48529	Nordhorn	781
616	50 - 200 km	84	84347	Pfarrkirchen	94032	Passau	57
617	201 - 500 km	84	84347	Pfarrkirchen	99817	Eisenach	449
618	>5 00 km	84	84347	Pfarrkirchen	14776	Brandenburg	577
619	50 - 200 km	84	84028	Landshut	93047	Regensburg	66
620	201 - 500 km	84	84028	Landshut	65183	Wiesbaden	413
621	>5 00 km	84	84028	Landshut	10117	Berlin	558
622	50 - 200 km	84	84478	Waldkraiburg	83022	Rosenheim	54
623	201 - 500 km	84	84478	Waldkraiburg	67547	Worms	446
624	>5 00 km	84	84478	Waldkraiburg	49074	Osnabrück	707

Nr.	Entfernungszone	PLZ-Gebiet	PLZ	Abgangsort	PLZ	Empfangsort	km
625	50 - 200 km	85	85072	Eichstätt	93047	Regensburg	96
626	201 - 500 km	85	85072	Eichstätt	53879	Euskirchen	474
627	>5 00 km	85	85072	Eichstätt	26919	Brake (Unterweser)	707
628	50 - 200 km	85	85049	Ingolstadt	86150	Augsburg	76
629	201 - 500 km	85	85049	Ingolstadt	65549	Limburg an der Lahn	388
630	>5 00 km	85	85049	Ingolstadt	16225	Eberswalde	576
631	50 - 200 km	85	85354	Freising	82319	Starnberg	66
632	201 - 500 km	85	85354	Freising	55116	Mainz	413
633	>5 00 km	85	85354	Freising	30900	Wedemark	652
634	50 - 200 km	86	86720	Nördlingen	73033	Göppingen	89
635	201 - 500 km	86	86720	Nördlingen	79539	Lörrach	384
636	>5 00 km	86	86720	Nördlingen	26826	Weener	669
637	50 - 200 km	86	86529	Schrobenhausen	91757	Treuchtlingen	82
638	201 - 500 km	86	86529	Schrobenhausen	4103	Leipzig	381
639	>5 00 km	86	86529	Schrobenhausen	19055	Schwerin	715
640	50 - 200 km	86	86150	Augsburg	91719	Heidenheim	87
641	201 - 500 km	86	86150	Augsburg	34497	Korbach	474
642	>5 00 km	86	86150	Augsburg	20354	Hamburg	747
643	50 - 200 km	87	87700	Memmingen	88045	Friedrichshafen	87
644	201 - 500 km	87	87700	Memmingen	34225	Baumatal	443
645	>5 00 km	87	87700	Memmingen	27749	Delmenhorst	724
646	50 - 200 km	87	87435	Kempten	88348	Bad Saulgau	85
647	201 - 500 km	87	87435	Kempten	98527	Suhl	391
648	>5 00 km	87	87435	Kempten	39307	Genthin	659
649	50 - 200 km	87	87561	Oberstdorf	82418	Murnau	121
650	201 - 500 km	87	87561	Oberstdorf	65232	Taunusstein	436
651	>5 00 km	87	87561	Oberstdorf	29525	Uelzen	737
652	50 - 200 km	88	88471	Laupheim	72488	Sigmaringen	74
653	201 - 500 km	88	88471	Laupheim	36037	Fulda	313
654	>5 00 km	88	88471	Laupheim	38440	Wolfsburg	584
655	50 - 200 km	88	88630	Pfullendorf	72379	Hechingen	65
656	201 - 500 km	88	88630	Pfullendorf	95444	Bayreuth	359
657	>5 00 km	88	88630	Pfullendorf	29664	Walsrode	697
658	50 - 200 km	88	88045	Friedrichshafen	87616	Marktobersdorf	114
659	201 - 500 km	88	88045	Friedrichshafen	63654	Büdingen	427
660	>5 00 km	88	88045	Friedrichshafen	15517	Fürstenwalde	758
661	50 - 200 km	89	89522	Heidenheim an der Brenz	86150	Augsburg	99
662	201 - 500 km	89	89522	Heidenheim an der Brenz	4808	Wurzen	449
663	>5 00 km	89	89522	Heidenheim an der Brenz	17139	Malchin	743
664	50 - 200 km	89	89073	Ulm	86150	Augsburg	88
665	201 - 500 km	89	89073	Ulm	9111	Chemnitz	426
666	>5 00 km	89	89073	Ulm	27568	Bremerhaven	728
667	50 - 200 km	89	89584	Ehingen (Donau)	88630	Pfullendorf	63
668	201 - 500 km	89	89584	Ehingen (Donau)	52249	Eschweiler	485
669	>5 00 km	89	89584	Ehingen (Donau)	26169	Friesoythe	699
670	50 - 200 km	90	90402	Nürnberg	92224	Amberg	67
671	201 - 500 km	90	90402	Nürnberg	30159	Hannover	466
672	>5 00 km	90	90402	Nürnberg	17291	Prenzlau	552
673	50 - 200 km	90	90762	Fürth	97215	Uffenheim	63
674	201 - 500 km	90	90762	Fürth	49179	Ostercappeln	492
675	>5 00 km	90	90762	Fürth	23552	Lübeck	664
676	50 - 200 km	90	90503	Wendelstein	73430	Aalen	124
677	201 - 500 km	90	90503	Wendelstein	6844	Dessau	323
678	>5 00 km	90	90503	Wendelstein	17033	Neubrandenburg	581
679	50 - 200 km	91	91257	Pegnitz	92421	Schwandorf	86
680	201 - 500 km	91	91257	Pegnitz	59872	Meschede	437
681	>5 00 km	91	91257	Pegnitz	21335	Lüneburg	512
682	50 - 200 km	91	91413	Neustadt Aisch	97070	Würzburg	59
683	201 - 500 km	91	91413	Neustadt Aisch	1558	Großenhain	348
684	>5 00 km	91	91413	Neustadt Aisch	29640	Schneverdingen	507
685	50 - 200 km	91	91757	Treuchtlingen	96047	Bamberg	131
686	201 - 500 km	91	91757	Treuchtlingen	59065	Hamm	491
687	>5 00 km	91	91757	Treuchtlingen	21481	Lauenburg (Elbe)	651
688	50 - 200 km	92	92637	Weiden	93047	Regensburg	87
689	201 - 500 km	92	92637	Weiden	57223	Kreuztal	464
690	>5 00 km	92	92637	Weiden	26954	Nordenham	656
691	50 - 200 km	92	92224	Amberg	93047	Regensburg	69
692	201 - 500 km	92	92224	Amberg	66111	Saarbrücken	418
693	>5 00 km	92	92224	Amberg	17309	Pasewalk	568

Nr.	Entfernungszone	PLZ-Gebiet	PLZ	Abgangsort	PLZ	Empfangsort	km
694	50 - 200 km	92	92318	Neumarkt	85049	Ingolstadt	66
695	201 - 500 km	92	92318	Neumarkt	33098	Paderborn	431
696	>5 00 km	92	92318	Neumarkt	26382	Wilhelmshaven	686
697	50 - 200 km	93	93437	Furth i. Wald	94032	Passau	130
698	201 - 500 km	93	93437	Furth i. Wald	78462	Konstanz	423
699	>5 00 km	93	93437	Furth i. Wald	49716	Meppen	719
700	50 - 200 km	93	93133	Burglengenfeld	90403	Nürnberg	95
701	201 - 500 km	93	93133	Burglengenfeld	14776	Brandenburg an der Havel	436
702	>5 00 km	93	93133	Burglengenfeld	26215	Wiefelstede	717
703	50 - 200 km	93	93047	Regensburg	85049	Ingolstadt	74
704	201 - 500 km	93	93047	Regensburg	34125	Kassel	409
705	>5 00 km	93	93047	Regensburg	16515	Oranienburg	527
706	50 - 200 km	94	91032	Passau	84307	EGgenfelden	72
707	201 - 500 km	94	94032	Passau	76131	Karlsruhe	460
708	>5 00 km	94	94032	Passau	49074	Osnabrück	694
709	50 - 200 km	94	94227	Zwiesel	93413	Cham	65
710	201 - 500 km	94	94227	Zwiesel	3238	Finsterwalde	478
711	>5 00 km	94	94227	Zwiesel	17358	Torgelow	732
712	50 - 200 km	94	91315	Straubing	93152	Nittendorf	59
713	201 - 500 km	94	94315	Straubing	35037	Marburg	451
714	>5 00 km	94	94315	Straubing	23626	Ratekau	807
715	50 - 200 km	95	95028	Hof	96450	Coburg	87
716	201 - 500 km	95	95028	Hof	48282	Emsdetten	496
717	>5 00 km	95	95028	Hof	25541	Brunsbüttel	605
718	50 - 200 km	95	95444	Bayreuth	92637	Weiden	63
719	201 - 500 km	95	95444	Bayreuth	15230	Frankfurt (Oder)	426
720	>5 00 km	95	95444	Bayreuth	18507	Grimmen	596
721	50 - 200 km	95	95615	Marktredwitz	96047	Bamberg	107
722	201 - 500 km	95	95615	Marktredwitz	66111	Saarbrücken	476
723	>5 00 km	95	95615	Marktredwitz	28195	Bremen	551
724	50 - 200 km	96	96317	Kronach	95615	Marktredwitz	79
725	201 - 500 km	96	96317	Kronach	87527	Sonthofen	421
726	>5 00 km	96	96317	Kronach	79539	Lörrach	542
727	50 - 200 km	96	96450	Coburg	98527	Suhl	52
728	201 - 500 km	96	96450	Coburg	87435	Kempten	371
729	>5 00 km	96	96450	Coburg	26316	Varel	521
730	50 - 200 km	96	96047	Bamberg	95444	Bayreuth	63
731	201 - 500 km	96	96047	Bamberg	2977	Hoyerswerda	340
732	>5 00 km	96	96047	Bamberg	26409	Wittmund	599
733	50 - 200 km	97	97616	Bad Neustadt	63739	Aschaffenburg	115
734	201 - 500 km	97	97616	Bad Neustadt	80331	München	331
735	>5 00 km	97	97616	Bad Neustadt	23966	Wismar	577
736	50 - 200 km	97	97437	Haßfurt	91054	Erlangen	79
737	201 - 500 km	97	97437	Haßfurt	4103	Leipzig	273
738	>5 00 km	97	97437	Haßfurt	23909	Ratzeburg	570
739	50 - 200 km	97	97070	Würzburg	63739	Aschaffenburg	82
740	201 - 500 km	97	97070	Würzburg	44787	Bochum	359
741	>5 00 km	97	97070	Würzburg	17192	Waren	618
742	50 - 200 km	98	98574	Schmalkalden	36037	Fulda	73
743	201 - 500 km	98	98574	Schmalkalden	1979	Lauchhammer	329
744	>5 00 km	98	98574	Schmalkalden	17438	Wolgast	597
745	50 - 200 km	98	98527	Suhl	36037	Fulda	123
746	201 - 500 km	98	98527	Suhl	3046	Cottbus	368
747	>5 00 km	98	98527	Suhl	24340	Eckernförde	541
748	50 - 200 km	98	98646	Hildburghausen	99084	Erfurt	110
749	201 - 500 km	98	98646	Hildburghausen	49661	Cloppenburg	461
750	>5 00 km	98	98646	Hildburghausen	18055	Rostock	590

Nr.	Entfernungszone	PLZ-Gebiet	PLZ	Abgangsort	PLZ	Empfangsort	km
751	50 - 200 km	99	99734	Nordhausen	37073	Göttingen	88
752	201 - 500 km	99	99734	Nordhausen	27211	Bassum	252
753	>5 00 km	99	99734	Nordhausen	79713	Bad Säckingen	646
754	50 - 200 km	99	99084	Erfurt	7743	Jena	58
755	201 - 500 km	99	99084	Erfurt	10178	Mitte Berlin	301
756	>5 00 km	99	99084	Erfurt	18439	Stralsund	568
757	50 - 200 km	99	99817	Eisenach	34212	Melsungen	112
758	201 - 500 km	99	99817	Eisenach	49610	Quakenbrück	326
759	>5 00 km	99	99817	Eisenach	17373	Ueckermünde	526
760	50 - 200 km	01	01945	Senftenberg	9122	Chemnitz	122
761	201 - 500 km	01	01945	Senftenberg	38440	Wolfsburg	343
762	>5 00 km	01	01945	Senftenberg	24103	Kiel	530
763	50 - 200 km	01	01587	Riesa	4103	Leipzig	83
764	201 - 500 km	01	01587	Riesa	92224	Amberg	339
765	>5 00 km	01	01587	Riesa	79098	Freiburg	712
766	50 - 200 km	01	01067	Dresden	2829	Görlitz	109
767	201 - 500 km	01	01067	Dresden	17033	Neubrandenburg	375
768	>5 00 km	01	01067	Dresden	47533	Kleve	638
769	50 - 200 km	02	02943	Weißwasser	3222	Kittlitz	76
770	201 - 500 km	02	02943	Weißwasser	93413	Cham	442
771	>5 00 km	02	02943	Weißwasser	46483	Wesel	698
772	50 - 200 km	02	02625	Bautzen	1067	Dresden	64
773	201 - 500 km	02	02625	Bautzen	93047	Regensburg	401
774	>5 00 km	02	02625	Bautzen	54290	Trier	690
775	50 - 200 km	02	02763	Zittau	2977	Hoyersverda	97
776	201 - 500 km	02	02763	Zittau	4103	Leipzig	237
777	>5 00 km	02	02763	Zittau	54634	Bitburg	752
778	50 - 200 km	03	03042	Cottbus	15907	Lübben	54
779	201 - 500 km	03	03042	Cottbus	17033	Neubrandenburg	311
780	>5 00 km	03	03042	Cottbus	67655	Kaiserslautern	700
781	50 - 200 km	03	03222	Lübbenau	1558	Großenhain	88
782	201 - 500 km	03	03222	Lübbenau	38440	Wolfsburg	297
783	>5 00 km	03	03222	Lübbenau	87435	Kempten	665
784	50 - 200 km	03	03238	Finsterwalde	15230	Frankfurt(Oder)	118
785	201 - 500 km	03	03238	Finsterwalde	18435	Stralsund	400
786	>5 00 km	03	03238	Finsterwalde	87629	Füssen	631
787	50 - 200 km	04	04916	Herzberg Elster	805	Zwickau	176
788	201 - 500 km	04	04916	Herzberg Elster	49074	Osnabrück	456
789	>5 00 km	04	04916	Herzberg Elster	82481	Mittenwald	611
790	50 - 200 km	04	04103	Leipzig	1069	Dresden	121
791	201 - 500 km	04	04103	Leipzig	17033	Neubrandenburg	396
792	>5 00 km	04	04103	Leipzig	24937	Flensburg	575
793	50 - 200 km	04	04600	Altenburg	8523	Plauen	78
794	201 - 500 km	04	04600	Altenburg	87700	Memmingen	477
795	>5 00 km	04	04600	Altenburg	26721	Emden	552
796	50 - 200 km	06	06842	Dessau-Roßlau	39104	Magdeburg	74
797	201 - 500 km	06	06842	Dessau-Roßlau	17309	Pasewalk	289
798	>5 00 km	06	06842	Dessau-Roßlau	77652	Offenburg	630

Nr.	Entfernungszone	PLZ-Gebiet	PLZ	Abgangsort	PLZ	Empfangsort	km
799	50 - 200 km	06	06526	Sangerhausen	39104	Magdeburg	100
800	201 - 500 km	06	06526	Sangerhausen	93047	Regensburg	398
801	>5 00 km	06	06526	Sangerhausen	78315	Radolfszell	560
802	50 - 200 km	06	06618	Naumburg Saale	99084	Erfurt	105
803	201 - 500 km	06	06618	Naumburg Saale	84028	Landshut	360
804	>5 00 km	06	06618	Naumburg Saale	52062	Aachen	536
805	50 - 200 km	07	07743	Jena	99084	Erfurt	54
806	201 - 500 km	07	07743	Jena	10115	Berlin	261
807	>5 00 km	07	07743	Jena	79539	Lörrach	614
808	50 - 200 km	07	07937	Zeulenroda-Triebes	9111	Chemnitz	88
809	201 - 500 km	07	07937	Zeulenroda-Triebes	80331	München	335
810	>5 00 km	07	07937	Zeulenroda-Triebes	25335	Elmshorn	531
811	50 - 200 km	07	07318	Wittgendorf	97421	Schweinfurt	163
812	201 - 500 km	07	07318	Wittgendorf	80331	München	356
813	>5 00 km	07	07318	Wittgendorf	18209	Bad Doberan	501
814	50 - 200 km	08	08056	Zwickau	95615	Marktreuditz	110
815	201 - 500 km	08	08056	Zwickau	59755	Arnsberg	417
816	>5 00 km	08	08056	Zwickau	24937	Flensburg	662
817	50 - 200 km	08	08523	Plauen	96515	Sonneberg	94
818	201 - 500 km	08	08523	Plauen	88348	Bad Saulgau	415
819	>5 00 km	08	08523	Plauen	29441	Jever	586
820	50 - 200 km	08	08340	Schwarzenberg	1069	Dresden	121
821	201 - 500 km	08	08340	Schwarzenberg	17033	Neubrandenburg	487
822	>5 00 km	08	08340	Schwarzenberg	26603	Aurich	629
823	50 - 200 km	09	09648	Mittweida	1069	Dresden	67
824	201 - 500 km	09	09648	Mittweida	86150	Augsburg	393
825	>5 00 km	09	09648	Mittweida	26655	Westerstede	522
826	50 - 200 km	09	09111	Chemnitz	95632	Wunsiedel	145
827	201 - 500 km	09	09111	Chemnitz	83022	Rosenheim	328
828	>5 00 km	09	09111	Chemnitz	66693	Mettlach	551
829	50 - 200 km	09	09456	Annaberg	1069	Dresden	130
830	201 - 500 km	09	09456	Annaberg	30159	Hannover	407
831	>5 00 km	09	09456	Annaberg	18311	Ribnitz-Damgarten	543

A.1.2 Transportliste der Spediteure

Liste mit zufälligen Transportbeispielen aus dem Kreis mittelständischer Spediti-
onsunternehmen.

Transportliste der Spediteure

Die folgenden Daten basieren auf einer Erhebung unter befreundeten Spediteuren.
Die Liste ist nach abgehenden Postleitzahlen sortiert.

Nr.	Entfernungszone	PLZ	Abgangsort	PLZ	Empfangsort
1	> 50 km	08606	Oelsnitz	40476	Düsseldorf
2	> 50 km	14727	Prennitz	93055	Regensburg
3	> 50 km	16761	Hennigsdorf	45478	Müllheim
4	> 50 km	34134	Kassel	50354	Hürth
5	> 50 km	35392	Gießen	56170	Bendorf
6	> 50 km	35745	Schönbach	53909	Zülpich
7	> 50 km	36211	Alheim	74336	Brackenheim
8	> 50 km	39122	Magdeburg	71691	Freiberg am Neckar
9	> 50 km	39126	Magdeburg	06246	Bad Lauchstädt
10	> 50 km	41460	Neuss	72270	Baiersbronn
11	> 50 km	44803	Bochum	73066	Uhingen
12	> 50 km	45721	Haltern	35088	Battenberg
13	> 50 km	45772	Marl	79664	Wehr
14	> 50 km	47053	Duisburg-Hochfeld	76061	Ebersbach
15	> 50 km	47198	Homberg	78713	Waldmössingen
16	> 50 km	47829	Krefeld	77709	Oberwolfach
17	> 50 km	49084	Osnabrück	70806	Kornwestheim
18	> 50 km	49549	Ladbergen	77694	Kehl
19	> 50 km	52457	Aldenhoven	56414	Niederahr
20	> 50 km	52511	Geilenkirchen	56412	Boden
21	> 50 km	53913	Straßfeld	56424	Mogendorf
22	> 50 km	54293	Trier	91795	Dollnstein
23	> 50 km	56412	Boden	63512	Hainburg
24	> 50 km	56414	Meudt	51105	Gremberg
25	> 50 km	56424	Moschheim	66663	Merzig
26	> 50 km	56626	Andernach	74177	Bad Friedrichshall
27	> 50 km	57170	Buir	65589	Hadamar
28	> 50 km	58089	Hagen	72205	Freudenstadt
29	> 50 km	58119	Hagen	69123	Heidelberg
30	> 50 km	59067	Hamm	68305	Mannheim
31	> 50 km	59199	Bönen	72505	Krauchenwies
32	> 50 km	59590	Geseke	63165	Mühlheim/Main
33	> 50 km	59590	Geseke	36124	Eichenzell
34	> 50 km	59929	Brilon	44579	Castrop-Rauxel
35	> 50 km	61352	Friedrichsdorf	56412	Boden
36	> 50 km	63456	Hanau	50171	Kerpen
37	> 50 km	63857	Waldaschaff	74172	Neckarsulm
38	> 50 km	64295	Darmstadt	68309	Mannheim
39	> 50 km	64319	Pfungstadt	32584	Löhne
40	> 50 km	64807	Dieburg	74076	Heilbronn
41	> 50 km	65326	Aarbergen	56170	Bendorf
42	> 50 km	65614	Obertiefenbach	48703	Stadtlohn
43	> 50 km	65626	Fachingen	56154	Boppard
44	> 50 km	66763	Dillingen	57586	Weitefeld
45	> 50 km	67065	Ludwigshafen	77836	Rheinmünster
46	> 50 km	67065	Ludwigshafen	65615	Marktrewitz
47	> 50 km	67065	Ludwigshafen	35708	Haiger
48	> 50 km	67065	Ludwigshafen	79725	Laufenburg
49	> 50 km	67065	Ludwigshafen	56170	Bendorf
50	> 50 km	67227	Frankenthal	32120	Hiddenhausen
51	> 50 km	67227	Frankenthal	45549	Sprockhövel
52	> 50 km	67547	Worms	15749	Mittenwalde
53	> 50 km	67547	Worms	59439	Holzwickede
54	> 50 km	67547	Worms	30952	Ronnenberg
55	> 50 km	68623	Lampertheim	77933	Lahr
56	> 50 km	69123	Heidelberg	58119	Hagen
57	> 50 km	70771	Leinfelden	91781	Weilenburg
58	> 50 km	71254	Ditzingen	55130	Mainz
59	> 50 km	71254	Ditzingen	65558	Cramberg
60	> 50 km	71296	Heimsheim	76448	Durmersheim
61	> 50 km	72070	Tübingen	72070	Tübingen
62	> 50 km	72160	Horb	41748	Viersen
63	> 50 km	72160	Horb	22851	Norderstedt
64	> 50 km	72160	Horb	31061	Alfeld

Nr.	Entfernungszone	PLZ	Abgangsort	PLZ	Empfangsort
65	> 50 km	72202	Nagold	96049	Bamberg
66	> 50 km	72202	Nagold	83024	Rosenheim
67	> 50 km	72202	Nagold	53844	Troisdorf
68	> 50 km	72202	Nagold	40476	Düsseldorf
69	> 50 km	72649	Wolfschlugen	76131	Hagsfeld
70	> 50 km	74076	Heilbronn	70435	Stuttgart
71	> 50 km	74626	Bretzfeld	75015	Bretten
72	> 50 km	75417	Mühlacker	86637	Wertingen
73	> 50 km	75417	Mühlacker	73635	Rudersberg
74	> 50 km	75417	Mühlacker	74078	Heilbronn
75	> 50 km	75428	Illingen	54492	Zeltingen
76	> 50 km	75428	Illingen	97478	Knetzgau
77	> 50 km	75428	Illingen	86720	Nördlingen
78	> 50 km	75428	Illingen	56645	Nickenich
79	> 50 km	76187	Karlsruhe	47809	Krefeld
80	> 50 km	76275	Ettlingen	60528	Frankfurt
81	> 50 km	76437	Rastatt	70435	Stuttgart
82	> 50 km	76456	Kuppenheim	41748	Viersen
83	> 50 km	76461	Muggensturm	65835	Liederbach
84	> 50 km	76593	Gernsbach	1454	Leppersdorf
85	> 50 km	76870	Kandel	74078	Heilbronn
86	> 50 km	76879	Essingen	59174	Kamen
87	> 50 km	76879	Essingen	44145	Dortmund
88	> 50 km	76879	Essingen	45711	Datteln
89	> 50 km	76879	Essingen	79589	Binzen
90	> 50 km	77709	Wolfach	38640	Goslar
91	> 50 km	77716	Haslach	48143	Münster
92	> 50 km	77815	Vimbuch	6188	Queiss
93	> 50 km	77839	Lichtenau	74229	Oedheim
94	> 50 km	77855	Achern	72172	Sulz
95	> 50 km	77866	Rheinau	71272	Renningen
96	> 50 km	78052	Villingen	33803	Steinhagen
97	> 50 km	78052	Villingen	33330	Gütersloh
98	> 50 km	78052	Villingen	32051	Herford
99	> 50 km	78098	Tübingen	59069	Hamm
100	> 50 km	78166	Donaueschingen	66793	Saarwellingen
101	> 50 km	79108	Freiburg im Breisgau	77880	Sasbach
102	> 50 km	79183	Waldkirch	30167	Hannover
103	> 50 km	79183	Waldkirch	10587	Berlin
104	> 50 km	79183	Waldkirch	4109	Leipzig
105	> 50 km	79268	Bötzingen	74254	Offenau
106	> 50 km	79268	Bötzingen	77694	Willstätt
107	> 50 km	79268	Bötzingen	49597	Rieste
108	> 50 km	79268	Bötzingen	93333	Neustadt
109	> 50 km	79268	Bötzingen	74172	Neckarsulm
110	> 50 km	79291	Merdingen	71296	Heimsheim
111	> 50 km	79312	Emmendingen	77855	Achern
112	> 50 km	79331	Teningen	89264	Weilbühlhorn
113	> 50 km	79336	Herbolzheim	79346	Endingen
114	> 50 km	79346	Endingen	42109	Wuppertal
115	> 50 km	79346	Endingen	56470	Bad Marienberg
116	> 50 km	79346	Endingen	77963	Schwanau
117	> 50 km	79618	Rheinfelden	66954	Pirmasens
118	> 50 km	79650	Schopfheim	79364	Malterdingen
119	> 50 km	79736	Rickenbach	32584	Löhne
120	> 50 km	79809	Weilheim	73312	Geislingen
121	> 50 km	83022	Rosenheim	75446	Wiernsheim
122	> 50 km	83308	Trostberg	53940	Hellenthal
123	> 50 km	83308	Trostberg	77723	Gengenbach
124	> 50 km	85232	Bergkirchen	71701	Schwieberdingen
125	> 50 km	86405	Meitingen	09599	Freiburg
126	> 50 km	86551	Aichach	65428	Rüsselsheim
127	> 50 km	88436	Eberhardzell	13089	Berlin
128	> 50 km	91465	Ergersheim	40549	Düsseldorf
129	> 50 km	91522	Ansabach	75223	Öschelbronn
130	> 50 km	91757	Treuchtlingen	76437	Rastatt
131	> 50 km	92353	Postbauer-Heng	99834	Gerstungen
132	> 50 km	93142	Maxhütte	72202	Nagold
133	> 50 km	93149	Nittenau	59494	Soest
134	> 50 km	94078	Freyung	76593	Reichenthal
135	> 50 km	97836	Esselbach	74343	Sachsenheim

A.2 Depotlisten

Die Angaben zu den Teilnehmern wurden von den sieben untersuchten Netzwerken nur teilweise zur Verfügung gestellt. Falls keine Angaben geliefert wurden, konnten diese aus den Veröffentlichungen im Internet entnommen werden, in denen jeweils die Systempartner aufgeführt sind.

Die hier abgelegten Listen nennen die Elektrostrecken für das kleine Hub-Netz.

Systempartnerliste für HUB-Verkehre				
24 Plus	Hauneck	36282		
PLZ	Ort	einfache Strecke [km]	einfache HO- Strecke [km]	tägliche Fahrten
04171	Radeburg	358	65,6	1
04587	Trebsen	277	47,1	1
09247	Chemnitz	253	47,1	1
12057	Berlin-Neukölln	424	47,1	1
17034	Neubrandenburg	538	47,1	1
19372	Spornitz	492	65,6	1
20539	Hamburg	379	65,6	1
23556	Lübeck	431	65,6	1
24783	Osterrönnfeld	473	65,6	1
25541	Brunsbüttel	463	65,6	1
26689	Apen/Augustenehn	405	65,6	1
27356	Rotenburg/W.	329	65,6	1
30855	Langenhagen	253	65,6	1
32457	Porta Westfalica	234	65,6	1
35708	Haiger	146	77,0	1
36039	Fulda	35,5	0	1
37079	Göttingen	118	65,6	1
39126	Magdeburg	309	65,6	1
41516	Grevenbroich	295	77	1
42327	Wuppertal	271	65,6	1
46459	Rees-Empel	333	65,6	1
48432	Rheine	289	65,6	1
52249	Eschweiler	312	77	1
54293	Trier-Ehrang	310	77	1
56220	Urmitz	208	77	1
58540	Meinerzhagen	205	77	1
58730	Fröndenberg	217	65,6	1
59494	Soest	187	65,6	1
63110	Rodgau	149	57,3	1
64331	Weiterstadt	165	93,8	1
66740	Saarlouis	337	93,8	1
68169	Mannheim	212	93,8	1
71634	Ludwigsburg	283	76,5	1
72766	Reutlingen	346	76,5	1
73460	Hüttlingen	277	76,5	1
74238	Krautheim	215	76,5	1
76287	Rheinstetten	282	93,8	1
78224	Singen	452	76,5	1
79238	Ehrenkirchen	414	93,8	1
82140	Olching	430	76,5	1
84478	Waldkraiburg	472	76,5	1

PLZ	Ort	einfache Strecke [km]	einfache HO- Strecke [km]	tägliche Fahrten
86156	Augsburg	383	76,5	1
88444	Ummendorf	367	76,5	1
88605	Meßkirch	452	76,5	1
87471	Durach	420	76,5	1
89079	Ulm	348	76,5	1
90431	Nürnberg	255	76,5	1
94315	Straubing	394	76,5	1
95030	Hof / Saale	248	47,1	1
96215	Lichtenfels	215	76,5	1
97082	Würzburg	163	76,5	1
99428	Nohra	130	47,1	1
		15.954	3.610	52
Mittlere Entfernung Depot--HUB		307 km		
mittlere HO-Strecke eine Fahrtrichtung		69 km		
HO-Anteil		22,6%		

Systempartnerliste für HUB-Verkehre				
IDS	Neuenstein	36286		
PLZ	Ort	einfache Strecke [km]	einfache HO- Strecke [km]	tägliche Fahrten
01458	Ottendorf-Okrilla	354	66,7	2
04420	Markgrastädt	253	66,7	1
09212	Limbach	266	66,7	1
14979	Großbeeren	415	66,7	2
14478	Potsdam	398	45,5	2
18196	Kavelstorf	532	45,5	2
21109	Hamburg	354	45,5	1
22113	Hamburg	355	45,5	1
24145	Kiel	453	45,5	2
26135	Oldenburg	334	45,5	1
28197	Bremen	355	45,5	2
30855	Langenhagen	234	45,5	1
33719	Bielefeld	179	45,5	1
34225	Baunatal	49,5	45,5	2
35708	Haiger	141	73,7	1
36282	Hauneck	26,1	9,6	1
39397	Schwanebeck	250	45,5	2
40721	Hilden	266	45,5	1

PLZ	Ort	einfache Strecke [km]	einfache HO- Strecke [km]	tägliche Fahrten
44147	Dortmund	214	45,5	1
46395	Bocholt	307	45,5	1
47807	Krefeld	288	45,5	1
49492	Westerkappeln	238	45,5	1
50997	Köln	259	73,7	1
55129	Mainz-Hechtsheim	178	90,3	2
56566	Neuwied	200	73,7	1
58119	Hagen	224	45,5	1
63741	Aschaffenburg	155	57,4	1
66424	Homburg	286	90,3	1
68169	Mannheim	216	90,3	1
71701	Schwieberdingen	291	76,2	1
74360	Ilfeld	265	76,2	1
74589	Satteldorf	245	76,2	1
76470	Ötigheim	295	90,3	1
77933	Lahr	365	90,3	1
78042	Villingen-Schwenningen	414	76,2	1
79331	Teningen	386	90,3	1
85235	Odelzhausen	412	76,2	1
83365	Aiging bei Traunstein	536	76,2	2
85386	Eching	404	76,2	1
86368	Gersthofen	383	76,2	1
87437	Kempten	412	76,2	1
88255	Baienfurt	415	76,2	1
89079	Ulm	348	76,2	1
89520	Heidenheim	298	76,2	2
90451	Nürnberg	257	76,2	1
94315	Straubing	398	76,2	1
95119	Naila	267	66,7	1
96215	Lichtenfels	228	76,2	2
97616	Bad Neustadt/Saale	103	49,1	1
97237	Altertheim	180	76,2	2
99885	Ohrdruf	118	66,7	1
		14.800	3.272	64
Mittlere Entfernung Depot--HUB		297	km	
mittlere HO-Strecke eine Fahrtrichtung		64	km	
HO-Anteil		21,41%		

Systempartnerliste für HUB-Verkehre				
CTL	Homberg Efze	34576		
PLZ	Ort	einfache Strecke [km]	einfache HO- Strecke [km]	tägliche Fahrten
02625	Bautzen	420	81,1	1
04158	Leipzig	296	81,1	1
04158	Leipzig	296	81,1	1
04736	Waldheim	328	81,1	1
06925	Annaburg	374	81,1	1
07745	Jena	194	81,1	1
08606	Tirpersdorf	316	81,1	1
09337	Hohenstein-Ernstthal	280	81,1	1
09627	Hilbersdorf	348	81,1	1
14979	Großbeeren	405	30,7	1
14979	Großbeeren	407	30,7	1
16727	Velten	420	30,7	1
17153	Stavenhagen	563	30,7	1
18196	Dummersdorf	524	30,7	1
18299	Kritzkow	545	30,7	1
19077	Lübesse	452	30,7	1
19372	Spornitz	464	30,7	1
21244	Buchholz	328	30,7	1
22113	Hamburg	347	30,7	1
22113	Hamburg	347	30,7	1
22113	Hamburg	347	30,7	1
23556	Lübeck	403	30,7	1
24837	Schleswig	481	30,7	1
26683	Saterland-Strücklingen	343	30,7	1
26835	Brinkum	389	30,7	1
27356	Rotenburg/Wümme	303	30,7	1
28197	Bremen	330	30,7	1
28816	Stuhr	324	30,7	1
28844	Weyhe	321	30,7	1
31867	Lauenau	238	30,7	1
32457	Porta Westfalica	207	30,7	1
32699	Extertal	163	30,7	1
33181	Wünnenberg Haaren	104	30,7	1
33415	Verl	152	30,7	1
34123	Kassel	48	30,7	1
34576	Homberg/Efze	4	0	1
35397	Gießen	109	89,2	1
35684	Dillenburg	163	87,4	1
35799	Merenberg	153	87,4	1
36093	Künzell	78,2	62,8	1
36100	Petersberg	71,8	62,8	1
37079	Göttingen	90,7	30,7	1
38112	Braunschweig	198	30,7	1

PLZ	Ort	einfache Strecke [km]	einfache HO- Strecke [km]	tägliche Fahrten
39164	Wanzleben-Börde	268	30,7	1
39397	Schwanebeck	228	30,7	1
39789	Hameln	175	30,7	1
40221	Düsseldorf-Hafen	267	30,7	1
40589	Düsseldorf	267	30,7	1
41189	Mönchengladbach	302	30,7	1
41334	Nettetal	297	30,7	1
42489	Wülfrath	249	30,7	1
42553	Velbert	241	30,7	1
42579	Heiligenhaus	260	30,7	1
42855	Remscheid	245	30,7	1
44319	Dortmund	195	30,7	1
45219	Essen	255	30,7	1
45549	Sprockhövel	230	30,7	1
45851	Gelsenkirchen	233	30,7	1
46242	Bottrop	254	30,7	1
46395	Bocholt	299	30,7	1
46414	Rhede	291	30,7	1
48529	Nordhorn	288	30,7	1
48599	Gronau	291	30,7	1
49078	Osnabrück	216	30,7	1
49451	Holdorf	264	30,7	1
49479	Ibbenbüren	238	30,7	1
51149	Köln	282	30,7	1
52156	Monschau-Kalterherberg	359	30,7	1
52351	Düren	321	30,7	1
52353	Düren	321	30,7	1
53721	Siegburg	256	87,4	1
53840	Troisdorf	263	87,4	1
54552	Nerdlen	284	87,4	1
55411	Bingen	223	104	1
55457	Gensingen	228	104	1
55459	Grolsheim	225	104	1
55459	Grolsheim	225	104	1
56424	Ebernahn	192	87,4	1
58089	Hagen	211	30,7	1
58093	Hagen	211	30,7	1
58540	Meinerzhagen	225	87,7	1
58638	Iserlohn	203	30,7	1
58730	Fröndenberg	189	30,7	1
59423	Unna	186	30,7	1
59909	Bestwig	152	30,7	1
60320	Frankfurt	155	104	1
63069	Offenbach	165	104	1
63110	Rodgau-Jügesheim	170	70,9	1
63571	Gelnhausen	135	70,9	1

PLZ	Ort	einfache Strecke [km]	einfache HO- Strecke [km]	tägliche Fahrten
64579	Gernsheim	202	104	1
65451	Kelsterbach	172	104	1
65719	Hofheim	173	104	1
66424	Homburg	304	104	1
66482	Zweibrücken	324	104	1
66793	Saarwellingen	346	104	1
67240	Bobenheim-Roxheim	239	104	1
67661	Kaiserslautern	276	104	1
68219	Mannheim	238	104	1
68535	Edingen-Neckarhausen	238	104	1
70435	Stuttgart	314	90	1
70736	Fellbach	318	90	1
70736	Fellbach	318	90	1
70806	Kornwestheim	317	90	1
72585	Riederich	358	90	1
72760	Reutlingen	364	90	1
73431	Aalen	301	90	1
73529	Schwäbisch Gmünd	321	90	1
73730	Esslingen	336	90	1
74360	Ilfeld	285	90	1
74706	Osterburken	248	90	1
74889	Sinsheim	275	104	1
75417	Mühlacker	330	104	1
76189	Karlsruhe	308	104	1
76189	Karlsruhe	308	104	1
76456	Kuppenheim	317	104	1
76870	Kandel	298	104	1
77694	Kehl	366	104	1
77855	Achern	344	104	1
78224	Singen	472	90	1
78224	Singen	472	90	1
78224	Singen	472	90	1
78554	Aldingen	424	90	1
78655	Dunningen	421	90	1
79258	Hartheim	435	104	1
82140	Olching	451	90	1
83365	Aiging	564	90	1
85391	Allershausen	410	90	1
85445	Schwaig	441	90	1
86462	Langweid-Forêt	412	90	1
87700	Memmingen	406	90	1
88145	Opfenbach	452	90	1
88521	Ertingen-Binzwangen	429	90	1
90449	Nürnberg	278	90	1
90451	Nürnberg	278	90	1
90451	Nürnberg	278	90	1

PLZ	Ort	einfache Strecke [km]	einfache HO- Strecke [km]	tägliche Fahrten
91589	Aurach	263	90	1
91781	Weißenburg	318	90	1
93057	Regensburg	380	90	1
93128	Regenstauf	374	90	1
94036	Passau	491	90	1
94405	Landau	464	90	1
95448	Bayreuth	279	90	1
96237	Ebersdorf	257	90	1
97469	Gochsheim	166	90	1
97941	Tauberbischofsheim	214	90	1
99735	Großwechungen	152	30,7	1
99880	Hörsel	118	81,1	1
		42.818	9.613	147
Mittlere Entfernung Depot--HUB		291	km	
mittlere HO-Strecke eine Fahrtrichtung		65	km	
HO-Anteil		22,5%		
Länge des Kreuzes		260	km	

Systempartnerliste für HUB-Verkehre				
DIALOG	Friedewald	36289		
PLZ	Ort	einfache Strecke [km]	einfache HO- Strecke [km]	tägliche Fahrten
01458	Ottendorf-Okrilla	322	35,8	1
06686	Lützen-Zorbau	201	35,8	1
08412	Werdau	214	35,8	1
09306	Zettlitz	269	35,8	1
14476	Potsdam	384	35,8	1
17166	Teterow	563	35,8	1
21129	Hamburg	391	77,1	1
24783	Osterrönfeld	484	77,1	1
27356	Rotenburg / Wümme	342	77,1	1
28197	Bremen	369	77,1	1
30855	Langenhagen	264	77,1	1
35745	Herborn-Hörsbach	140	85,2	1
36282	Hauneck	16,5	14,2	1
39397	Schwanebeck	251	35,8	1
42855	Remscheid	284	77,1	1
46242	Bottrop	293	77,1	1
49328	Melle-Riemsloh	237	77,1	1
52249	Eschweiler	323	85,5	1
56218	Mülheim-Kärlich	208	85,5	1
63110	Rodgau	160	68,8	1
64331	Weiterstadt	177	101,9	1
68219	Mannheim	228	101,9	1
68542	Heddesheim	219	101,9	1
71522	Backnang	309	88,1	1
72766	Reutlingen	356	88,1	1
76189	Karlsruhe	291	101,9	1
76461	Muggensturm	303	101,9	1
79238	Ehrenkirchen-Kirchhofen	425	101,9	1
85551	Kirchheim	436	88,1	1
86156	Augsburg	395	88,1	1
87480	Weitnau	452	88,1	1
90441	Nürnberg	269	88,1	1
94405	Landau	442	88,1	1
96237	Ebersdorf Coburg	205	35,8	1
97234	Reichenberg	179	88,1	1
		10.402	2.559	35
Mittlere Entfernung Depot--HUB		297 km		
mittlere HO-Strecke eine Fahrtrichtung		73 km		
HO-Anteil		24,6%		

Systempartnerliste für HUB-Verkehre				
Cargoline	Eichenzell	36124		
PLZ	Ort	einfache Strecke [km]	einfache HO- Strecke [km]	tägliche Fahrten
01723	Wilsdruf	368	104	1
06112	Halle	297	104	1
07580	Ronneburg	260	104	1
14478	Potsdam	438	104	1
18146	Rostock	597	102	1
21129	Hamburg	418	102	1
22113	Hamburg	412	102	1
25524	Itzehoe	473	102	1
28197	Bremen	396	102	1
31319	Sehnde	266	102	1
33106	Paderborn	193	102	1
31123	Kassel	116	102	1
36124	Eichenzell	2,3	0	1
37079	Göttingen	156	102	1
39126	Magdeburg	347	102	1
40597	Düsseldorf	303	0	1
41066	Mönchengladbach	363	0	1
46395	Bocholt	364	102	1
47229	Duisburg	328	102	1
49090	Osnabrück	288	102	1
54311	Trierweiler	298	0	1
55543	Bad Kreuznach	181	0	1
57290	Neunkirchen	191	0	1
58332	Schwelm	296	102	1
59425	Unna	255	102	1
60528	Frankfurt	106	0	1
63814	Mainaschaff	92,8	0	1
64584	Biebesheim	144	0	1
68169	Mannheim	174	0	1
72213	Altensteig	299	0	1
73037	Göppingen	265	18,9	1
74078	Heilbronn	208	18,9	1
77694	Kehl	308	0	1
78554	Aldingen	348	18,9	1
79108	Freiburg	357	0	1
84503	Altötting	449	18,9	1
85375	Neufahrn	350	18,9	1
87437	Kempten	356	18,9	1
88255	Baienfurt	359	18,9	1
89231	Neu-Ulm	283	18,9	1
90451	Nürnberg	204	18,9	1
93083	Obertraubling	305	18,9	1
94447	Plattling	371	18,9	1

PLZ	Ort	einfache Strecke [km]	einfache HO- Strecke [km]	tägliche Fahrten
95176	Konradsreuth	231	18,9	1
97520	Röthlein	92,2	18,9	1
99428	Nohra	189	104	1
		13.097	2.296	46
Mittlere Entfernung Depot--HUB		285 km		
mittlere HO-Strecke eine Fahrtrichtung		50 km		
HO-Anteil		17,5%		

Systempartnerliste für HUB-Verkehre				
VTL	Fulda	36041		
PLZ	Ort	einfache Strecke [km]	einfache HO- Strecke [km]	tägliche Fahrten
01723	Kesseldorf	365	93,8	1
04827	Gerichshain	324	93,8	1
06686	Lützen-Zorbau	269	93,8	1
06925	Annaburg-Groß Naundorf	390	93,8	1
07745	Jena	210	93,8	1
09337	Hohenstein-Ernstthal	295	93,8	1
14142	Großbeeren	449	93,8	1
17034	Neubrandenburg	594	93,8	1
18196	Dummersdorf	587	91,2	1
19077	Lübesse	517	91,2	1
19372	Spornitz	434	91,2	1
21244	Buchholz	406	91,2	1
22113	Hamburg	410	91,2	1
23556	Lübeck	466	91,2	1
24976	Handewitt	566	91,2	1
25482	Appen	433	91,2	1
26845	Nortmoor	456	91,2	1
28309	Bremen-Hemelingen	378	91,2	1
30453	Hannover-Bornum	275	91,2	1
35394	Gießen	106	88,4	1
36041	Fulda	8	0	1
39343	Uhrleben	315	91,2	1
40764	Langenfeld	267	88,4	1
41334	Nettetal	360	91,2	1
41460	Neuss-Hafen	311	88,4	1
42369	Wuppertal	302	91,2	1
45891	Gelsenkirchen	302	91,2	1

PLZ	Ort	einfache Strecke [km]	einfache HO- Strecke [km]	tägliche Fahrten
48527	Nordhorn	355	91,2	1
48529	Nordhorn	351	91,2	1
48599	Gronau	354	91,2	1
49439	Steinfeld-Mühen	333	91,2	1
52249	Eschweiler	337	88,4	1
53721	Siegburg	261	88,4	1
55252	Mainz-Kastel	142	0	1
56424	Ebernshahn	197	88,4	1
56766	Ulmen	274	88,4	1
57258	Freudenberg	199	88,4	1
58300	Wetter	282	91,2	1
58730	Fröndenberg	252	91,2	1
59387	Ascheberg	282	91,2	1
59494	Soest	222	91,2	1
59929	Brilon	187	91,2	1
60314	Frankfurt	103	0	1
60386	Frankfurt	100	0	1
63571	Gelnhausen	64,8	0	1
64331	Weiterstadt	129	0	1
66450	Bexbach	262	0	1
68535	Edingen-Neckarhausen	188	0	1
70794	Filderstadt	282	31	1
70806	Kornwestheim	254	31	1
70825	Korntal-Münchingen	249	31	1
72393	Burladingen	338	31	1
72517	Sigmaringendorf	362	31	1
73529	Schwäbisch-gmünd	260	31	1
74238	Krautheim	173	31	1
74706	Osterburken	182	31	1
76870	Kandel	248	0	1
77877	Achern	297	0	1
78166	Donauessingen	374	31	1
78224	Singen	409	31	1
79194	Gundelfingen	371	0	1
79588	Effringen-Kirchen	424	0	1
85748	Garching	372	31	1
85764	Oberschleißheim	371	31	1
86462	Langweid	306	31	1
87437	Kempten	369	31	1
88250	Weingarten	375	31	1
89075	Ulm	293	31	1
90427	Nürnberg	208	31	1
91781	Weissenburg	271	31	1
94431	Pilsting-Ganacker	380	31	1
95502	Himmelkron	208	31	1
96237	Ebersdorf	191	31	1

		22.237	4.297	73
Mittlere Entfernung Depot--HUB		305	km	
mittlere HO-Strecke eine Fahrtrichtung		59	km	
HO-Anteil		19,3%		

Systempartnerliste für HUB-Verkehre				
ELVIS	Küllwald	34593		
PLZ	Ort	einfache Strecke [km]	einfache HO- Strecke [km]	tägliche Fahrten
01665	Klipphausen	342	81,1	1
01723	Wilsdruff-Kesselsdorf	342	81,1	1
02959	Schleife	463	81,1	1
03238	Finsterwalde	427	81,1	1
04109	Leipzig	287	30,7	1
04179	Leipzig	287	30,7	1
04249	Leipzig	288	81,1	1
04249	Leipzig	288	81,1	1
04827	Gerichshain	303	30,7	1
08056	Zwickau	358	81,1	1
08056	Zwickau	358	81,1	1
08412	Werdau	259	81,1	1
15848	Beeskow	464	30,7	1
19370	Parchim	375	30,7	1
20538	Hamburg	345	30,7	1
21035	Hamburg	350	30,7	1
22113	Hamburg-Billbrook	348	30,7	1
22145	Braak Hamburg	367	30,7	1
22769	Hamburg	349	30,7	1
23556	Lübeck	396	30,7	1
23942	Dassow	435	30,7	1
24539	Neumünster	406	30,7	1
24783	Osterrönfeld	438	30,7	1
24976	Handewitt	496	30,7	1
26197	Ahlhorn	304	30,7	1
26506	Norden	434	30,7	1
26689	Apen	361	30,7	1
26919	Brake	351	30,7	1
27374	Visselhövede	271	30,7	1
28844	Weyhe	337	30,7	1
30167	Hannover	201	30,7	1
31582	Nienburg	256	30,7	1
32051	Herford	181	30,7	1
32457	Porta Westfalica	199	30,7	1

PLZ	Ort	einfache Strecke [km]	einfache HO- Strecke [km]	tägliche Fahrten
32457	Porta Westfalica	199	30,7	1
32549	Bad Oeynhausen	196	30,7	1
33104	Paderborn	128	30,7	1
33106	Paderborn	121	30,7	1
33142	Büren	120	30,7	1
33415	Verl	145	30,7	1
34123	Kassel	48,5	30,7	1
34253	Lohfelden	39,4	30,7	1
35394	Gießen	103	95,8	1
36100	Petersberg	66	63,6	1
36124	Eichenzell	74,6	73,6	1
37079	Göttingen	83,3	30,7	1
38444	Wolfsburg	210	30,7	1
41189	Mönchengladbach	295	30,7	1
42389	Wuppertal	223	30,7	1
42699	Solingen	257	30,7	1
44149	Dortmund	198	30,7	1
45665	Recklinghausen	219	30,7	1
46282	Dorsten	252	30,7	1
46286	Dorsten	249	30,7	1
46395	Bocholt	300	30,7	1
46459	Rees	305	30,7	1
46659	Recklinghausen	223	30,7	1
47058	Duisburg	246	30,7	1
48653	Coesfeld	261	30,7	1
48654	Coesfeld	265	30,7	1
49078	Osnabrück	209	30,7	1
49324	Melle	191	30,7	1
49401	Damme	246	30,7	1
49439	Mühlen	263	30,7	1
49439	Steinfeld	263	30,7	1
49549	Ladbergen	234	30,7	1
49565	Bramsche	234	30,7	1
49716	Meppen	315	30,7	1
49733	Haren-Rütenbrock	321	30,7	1
50977	Köln	284	89,5	1
51545	Waldbröl	228	89,5	1
52351	Düren	314	89,5	1
53225	Bonn-Beuel	256	89,5	1
53340	Meckenheim	275	89,5	1
53721	Siegburg	249	89,5	1
53925	Kall	339	89,5	1
54311	Trierweiler	334	89,5	1
54338	Schweich-Issel	315	89,5	1
54427	Kell am See	352	104	1
54486	Mülheim an der Mosel	300	104	1

PLZ	Ort	einfache Strecke [km]	einfache HO- Strecke [km]	tägliche Fahrten
54516	Wittlich	293	89,5	1
54552	Nerdlen	268	89,5	1
54552	Dreis-Brück	267	89,5	1
55252	Mainz-Kastel	176	104	1
55545	Bad Kreuznach	230	104	1
55767	Niederbrombach	306	104	1
56424	Ebernshahn	185	89,5	1
58099	Hagen Westfalen	199	30,7	1
58239	Schwerte	195	30,7	1
58332	Schwelm	223	30,7	1
59423	Unna	179	30,7	1
63571	Gelnhausen	128	72,1	1
63755	Alzenau	155	72,1	1
63791	Karlstein	160	72,1	1
64584	Biebesheim	195	104	1
64807	Dieburg	178	72,1	1
66440	Blieskastel	317	104	1
66450	Bexbach	304	104	1
66687	Wadern	344	104	1
66740	Saarlouis	351	104	1
66740	Saarlouis	351	104	1
67227	Frankenthal	230	104	1
68219	Mannheim	231	104	1
69168	Wiesloch	252	104	1
70825	Korntal-Münchingen	305	90	1
71679	Asperg	299	90	1
72221	Haiterbach	367	90	1
72517	Sigmaringendorf	445	90	1
73061	Ebersbach/Fils	343	90	1
73235	Weilheim	365	90	1
73249	Wernau	335	90	1
73529	Schwäbisch Gmünd	313	90	1
73529	Schwäbisch Gmünd	313	90	1
74078	Heilbronn	294	104	1
74238	Krautheim	229	90	1
74354	Besigheim	292	90	1
75417	Mühlacker	321	104	1
76275	Ettlingen	293	104	1
76316	Malsch	300	104	1
74632	Neuenstein	294	90	1
76456	Kuppenheim	310	104	1
76684	Östringen	267	104	1
76744	Wörth	301	104	1
77855	Achern	336	104	1
77955	Ettenheim	387	104	1
78224	Singen	465	90	1

PLZ	Ort	einfache Strecke [km]	einfache HO- Strecke [km]	tägliche Fahrten
78224	Singen	465	90	1
78467	Konstanz	482	90	1
83026	Rosenheim	505	90	1
84416	Taufkirchen	464	90	1
85126	Münchsmünster	379	90	1
85716	Unterschleißheim	422	90	1
86179	Augsburg	413	90	1
86356	Neusäss	397	90	1
86368	Gersthofen	397	90	1
86754	Munningen-Schwörzheim	302	90	1
89269	Vöhringen	362	90	1
89542	Herbrechtingen	320	90	1
89555	Sönnstetten	322	90	1
89616	Rottenacker	392	90	1
90451	Nürnberg	274	90	1
90518	Altorf bei Nürnberg	290	90	1
91074	Herzogenaurach	243	90	1
91550	Dinkelsbühl	267	90	1
91781	Weißenburg	327	90	1
93073	Neutraubling	377	90	1
93495	Weiding	413	90	1
94447	Plattling	440	90	1
95030	Hof	280	81,1	1
95032	Hof/Saale	284	81,1	1
95145	Oberkotzau	293	81,1	1
95448	Bayreuth	272	90	1
95448	Bayreuth	211	90	1
96132	Reichmannsdorf	261	90	1
96317	Kronach-Friesen	261	90	1
97348	Markt Einersheim	217	90	1
99735	Großwechungen	145	30,7	1
		45.383	10.554	157
Mittlere Entfernung Depot--HUB		289	km	
mittlere HO-Strecke eine Fahrtrichtung		67	km	
HO-Anteil		23,3%		
Länge des Kreuzes		260	km	

A.3 Basisparameter

Fahrzeuge 1

DIESEL-SZM

Anschaffungskosten je Diesel SZM	PK_{die}	100.000 €
Nutzungsdauer je Diesel-SZM	tn_{die}	5
Wiederverkaufswert Diesel-SZM	PW_{die}	20.000 €
Faktor Reparaturkosten Diesel-SZM	FR_{die}	5%
Steuer je Diesel-SZM pro Jahr	PS_{die}	600 €
Versicherung je Diesel-SZM pro Jahr	PV_{die}	3.600 €
Maut Diesel-SZM	PM_{die}	0,35 €
Dieselverbrauch [l/km]	V_{die}	0,30
Dieselpreis [€/l]	PT_{die}	1,85 €
Faktor CO ₂ e Diesel [t/l]	FC_{die}	0,00324
Faktor Grüner Diesel	KF_{gd}	0%
Korrekturfaktor für Nutzlastverlust	KF_{nula}	0%

HO-DIESEL-SZM

Anschaffungskosten je HO-Diesel SZM	PK_{hodie}	140.000 €
Nutzungsdauer je HO-Diesel-SZM [Jahre]	tn_{hodie}	5
Wiederverkaufswert HO-Diesel-SZM	PW_{hodie}	10.000 €
Faktor Reparaturkosten HO-Diesel-SZM	FR_{hodie}	5%
Faktor Reparaturkosten Minderung bei HO-Diesel-SZM	$FR_{hominde}$	0%
Steuer je HO-Diesel-SZM pro Jahr	PS_{hodie}	600 €
Versicherung je HO-Diesel-SZM pro Jahr	PV_{hodie}	3.600 €
Maut HO-Diesel-SZM im Stromantrieb [€/km]	$PM_{hodieho}$	0,052 €
Maut HO-Diesel-SZM im Dieselantrieb [€/km]	PM_{hodie}	0,35 €
Strompreis [€/kWh]	PT_{stro}	0,27 €
Stromverbrauch [kWh/km]	V_{stro}	1,25
Korrekturfaktor Rekuperation	KF_{rekup}	15%
Faktor CO ₂ e Strom [t/kWh]	FC_{str}	0,000401
Faktor Grüner Strom	KF_{gs}	100%
Faktor Nutzung HO-Strecke	FN_{ho}	60%
Korrekturfaktor für Nutzlastverlust	KF_{nula}	4,17%

HO-BATTERIE-SZM

Anschaffungskosten je HO-Batterie SZM	PK_{hobab}	140.000 €
Nutzungsdauer je HO-Batterie-SZM	tn_{hobab}	5
Wiederverkaufswert HO-Batterie-SZM	PW_{hobab}	10.000 €
Faktor Reparaturkosten HO-Batterie-SZM	FR_{hobab}	5%
Faktor Reparaturkosten Minderung bei HO-Batterie-SZM	$FR_{hominbat}$	10%
Steuer je HO-Batterie-SZM pro Jahr	PS_{hobab}	600 €
Versicherung je HO-Batterie-SZM pro Jahr	PV_{hobab}	3.600 €
Maut HO-Batterie-SZM im Stromantrieb auf der HO-Strecke [€/km]	$PM_{hobatho}$	0,052 €
Maut HO-Batterie-SZM im Stromantrieb außerhalb der HO-Strecke [€/km]	PM_{hobab}	0,35 €
Strompreis auf der HO-Strecke [€/kWh]	PT_{hostr}	0,27 €
Stromverbrauch auf der HO-Strecke [kWh/km]	V_{hostr}	1,25
Faktor Nutzung HO-Strecke	FN_{ho}	60%
Strompreis aus der Batterie [€/kWh]	$PT_{hostrbat}$	0,27 €
Stromverbrauch aus der Batterie [kWh/km]	$V_{hostrbat}$	1,25
Faktor CO ₂ e HO-Strom [t/kWh]	FC_{str}	0,000401
Faktor Grüner Strom	FK_{gs}	100%
Faktor Nutzung HO-Strecke	FN_{ho}	60%
Korrekturfaktor für Nutzlastverlust	$KF_{nulabat}$	4,17%

Fahrzeuge 2

HO-HVO-SZM

Anschaffungskosten je HO-HVO SZM	PK_{hohvo}	140.000 €
Nutzungsdauer je HO-HVO-SZM	tn_{hohvo}	5
Wiederverkaufswert HO-HVO-SZM	PW_{hohvo}	10.000 €
Faktor Reparaturkosten HO-HVO-SZM	FR_{hohvo}	5%
Faktor Reparaturkosten Minderung bei HO-HVO-SZM	$FR_{\text{hohminhvo}}$	0%
Steuer je HO-HVO-SZM pro Jahr	PS_{hohvo}	600 €
Versicherung je HO-HVO-SZM pro Jahr	PV_{hohvo}	3.600 €
Maut HO-HVO-SZM im Stromantrieb auf der HO-Strecke [€/km]	PM_{hohvoho}	0,052 €
Maut HO-HVO-SZM im HVO-Dieselantrieb außerhalb der HO-Strecke [€/km]	PM_{hohvo}	0,35 €
Strompreis auf der HO-Strecke [€/kWh]	PT_{hostr}	0,27 €
Stromverbrauch auf der HO-Strecke [kWh/km]	V_{hostr}	1,25
Faktor CO ₂ e HO-Strom [t/kWh]	FC_{str}	0,000401
Faktor Grüner Strom	FK_{gs}	100%
HVO-Dieserverbrauch [l/km]	V_{hvo}	0,3
HVO-Dieselpreis [€/l]	PT_{hvo}	2,05 €
Faktor CO ₂ e HVO-Diesel [t/l]	FC_{die}	0,00324
Faktor Grüner HVO-Diesel	FK_{hvo}	90%
Faktor Nutzung HO-Strecke	FN_{ho}	60%
Korrekturfaktor für Nutzlastverlust	FK_{nulahvo}	4,17%

HVO-DIESEL-SZM

Anschaffungskosten je HVO-Diesel SZM	PK_{hvo}	100.000 €
Nutzungsdauer HVO-Diesel-SZM	tn_{hvo}	5
Wiederverkaufswert HVO-Diesel-SZM	PW_{hvo}	20.000 €
Faktor Reparaturkosten HVO-Diesel-SZM	FR_{hvo}	5%
Steuer HVO- Diesel-SZM pro Jahr	PS_{hvo}	600 €
Versicherung HVO-Diesel-SZM pro Jahr	PV_{hvo}	3.600 €
Maut HVO-Diesel-SZM	PM_{hvo}	0,35 €
HVO-Dieserverbrauch [l/km]	V_{hvo}	0,3
HVO-Dieselpreis [€/l]	PT_{hvo}	2,05 €
Faktor CO ₂ e Diesel [t/l]	FC_{hvo}	0,00324
Faktor Grüner HVO-Diesel	FK_{hvo}	90%
Korrekturfaktor für Nutzlastverlust	FK_{nulahvo}	0%

BATTERIE-SZM

Anschaffungskosten je Batterie-SZM	PK_{bat}	300.000 €
Nutzungsdauer je Batterie-SZM	tn_{bat}	5
Wiederverkaufswert Batterie-SZM	PW_{bat}	10.000 €
Faktor Reparaturkosten Batterie-SZM	FR_{bat}	5%
Faktor Reparaturkosten Minderung bei Batterie-SZM	FR_{minbat}	10%
Steuer je Batterie-SZM pro Jahr	PS_{bat}	600 €
Versicherung je Batterie-SZM pro Jahr	PV_{bat}	3.600 €
Maut Batterie-SZM im Stromantrieb auf der HO-Strecke [€/km]	PM_{bat}	0,052 €
Strompreis aus der Batterie [€/kWh]	PT_{bat}	0,27 €
Stromverbrauch aus der Batterie [kWh/km]	V_{bat}	1,25
Faktor CO ₂ e HO-Strom [t/kWh]	FC_{str}	0,000401
Faktor Grüner Strom	FK_{gs}	100%
Korrekturfaktor für Nutzlastverlust	FK_{nulahvo}	4,17%

Trailer

Anzahl Trailer	ZF_{tr}	183.000
Anschaffungskostenkosten je Trailer	PK_{tr}	35.000 €
Nutzungsdauer Trailer	tn_{tr}	8
Wiederverkaufswert Trailer	PW_{tr}	5.000 €
Faktor Reparaturkosten Trailer	FR_{tr}	5%
Steuer Trailer	PS_{tr}	- €
Versicherung Trailer	PV_{tr}	600 €

Trasse, Personal, Tourdaten

Trasse

Trassenlänge [km] (deutsches Autobahnnetz)	s_{auto}	14.000
Trassenlänge [km] HO-Strecke (Kernnetz)	s_{ho}	4.000
Trassenlänge [km] Traktionsstrecke-Strecke	s_{trak}	350
Trassen-Grundpreis HO-Strecke[€/km]	PB_{tras}	2.000.000 €
Nutzungsdauer HO-Strecke [Jahre]	tn_{tras}	30
Reparaturkosten HO-Trasse	FR_{tras}	10%
spez. CO2-Ausstoß Trasse [to/1 km]	FC_{tras}	10
Preis je Stellplatz	PU_{platz}	500 €

Personal

Zulässige tägliche Lenkzeit [h]	t_{zulenk}	9
Zulässige tägliche Arbeitszeit [h]	t_{zuarb}	9,6
Einsatztage pro Jahr	ZZ_{et}	240
Urlaubstage Fernverkehr	ZZ_{ufern}	30
Urlaubstage Nahverkehr	ZZ_{unah}	30
Krankheitstage Fernverkehr	ZZ_{rafern}	15
Krankheitstage Nahverkehr	ZZ_{ranah}	15
Urlaubstage Disponent	ZZ_{udis}	30
Krankheitstage Disponent	ZZ_{radis}	10
Personalkosten Fernfahrer pro Jahr	CP_{fern}	36.400 €
Personalkosten Nahverkehrsfahrer pro Jahr	CP_{nah}	34.450 €
Spesen Fernverkehr pro Einsatztag	CP_{spefern}	24 €
Spesen Nahverkehr pro Einsatztag	CP_{nah}	12 €
Personalkosten Disponent pro Jahr	CP_{dis}	58.500 €
Korrekturfaktor Personal Zusatzfahrer nah	FK_{zfah}	19%
Korrekturfaktor Personal Zusatzfahrer fern	FK_{zfern}	19%
Faktor Personal Normausstattung Disponent	FP_{nodis}	20
Korrekturfaktor Personal Zusatz Disponent	FK_{zudis}	17%

Tourdaten

Zahl Beladestellen	ZL_{bela}	2
Zahl Entladestellen	ZL_{entla}	1
Dauer je Beladestelle [h]	t_{bela}	0,75
Dauer je Entladestelle [h]	t_{entla}	1,00
Strecke zwischen Ladestellen [km]	s_{bela}	30
Strecke zwischen Entladestellen [km]	s_{entla}	30
Strecke Anfahrt [km]	s_{an}	40
Strecke Zulauf [km]	s_{zu}	45,5
Strecke Ablauf [km]	s_{ab}	45,5
Strecke Hauptlauf [km]	s_{hl}	441
Strecke Umschlagpunkt 2 zu Traktionsstrecke [km]	s_{u2}	15
Strecke Umschlagpunkt 1 zu Traktionsstrecke [km]	s_{u1}	15
Faktor mautfreie Straße	FK_{mau}	10%

LKW-Preise

Standard-SZM	100,000 €
HO-DIE-SZM	140,000 €
Batterie-SZM	320,000 €
Nahverkehrs-SZM mit Batterie 200 km Reichweite	194,000 €
Traktions-SZM mit Batterieantrieb 80 km	167,000 €

Herleitung von Preisen

Standard-SZM	100,000 €
Motor, Kupplung, Getriebe	50,000 €
Chassis	50,000 €
Batterie-SZM	320,000 €
./ Chassis	50,000 €
Rest für E-Antrieb mit 500 km Reichweite	270,000 €
Minus E-Motor	50,000 €
Minus Getriebe	10,000 €
Verbleibt für Batterie	210,000 €
Reichweite	500 km
spez. Batteriekosten	420 € je km
Nahverkehrs-SZM mit Batterieantrieb ohne Batterie	110,000 €
spez. Batteriekosten	420 €
Reichweite	200 € km
Kosten der Batterie	84,000 €
Nahverkehrs-SZM mit Batterie 200 km Reichweite	194,000 €
Traktions-SZM mit Batterie	
HO-DIE-SZM	140,000 €
Motor, Kupplung, Getriebe	50,000 €
Chassis	50,000 €
E-Antrieb ohne Batterie	40,000 €
Plus E-Motor	50,000 €
Plus Getriebe	10,000 €
HO-BAT-SZM ohne Batterie	100,000 €
Reichweite	80 € km
spez. Batteriekosten	420 € je km
Kosten der Batterie	33,600 €
Preis für Traktions-SZM mit Batterie	133,600 €
Aufschlag 2-Schicht und Reserve	25%
Traktions-SZM mit Batterieantrieb 80 km	167,000 €

Kosten für Umschlagplätze

Fläche abgestellter Trailer (3m*15m)	45 m ²
Mietpreis Außengelände	1.00 €
Mietpreis je Platz und Monat	45.00 €
Monate	12
Preis je Trailerstellplatz und Jahr	540.00 €

Fläche für Umschlagplatz m2	20,000 m ²
Mietpreis Außengelände	1.75 €
Monate	12
Preis pro Jahr	420,000 €
Anzahl Parkplätze	110
Preis je Trailerstellplatz und Jahr	3,818.18 €

Fläche für Umschlagplatz	20,000 m ²
Kaufpreis Industriegelände	100 €
Kaufpreis Industriegelände	24,000,000 €
Nutzungsdauer	50 Jahre
	480,000 €
Anzahl Parkplätze	110
Preis je Trailerstellplatz und Jahr	4,363.64 €

Veränderung der Systemkosten wegen höherer Preise für Umschlagpunkte

Systemkosten HO-Tramp-Modell	36,232,584,294 €
Systemkosten HO-Trak-Modell	35,524,763,042 €
Differenz	707,821,252 €

Zahl Stellplätze	1,707 €
Mehrpreis für Stellplätze	3,500 €
	5,974,500 €
Differenz nach Erhöhung Preis Stellplatz	701,846,752 €

proz. Kostensenkung mit kalk. Preis	1.95%
proz. Kostensenkung mit kalk. Preis	1.94%

A.4 Literaturrecherche

In der untersuchten Literatur finden sich zum Thema Geschäftsmodell und Betriebsmodell im Güterkraftverkehr und zu deren Unterschied kaum nennenswerte Quellen. Jöhrens (2017) spricht in seiner SWOT-Analyse von Betriebskonzepten und unterscheidet dabei den LKW-Antrieb mit Gas, Wasserstoff oder Strom aus der Oberleitung, ohne aber die Unterschiede im Betrieb zu erklären. Wenn in anderen Quellen auf mögliche Geschäftsmodelle eingegangen wird, dann meist auf mögliche Stakeholder des Systems wie z.B. Erbauer oder Betreiber der HO-Strecke, Stromversorger, Erbauer oder Betreiber von Ladestationen, oder Firmen, welche die Abrechnung des Strombezugs übernehmen.

Die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Betriebsmodelle Trampverkehr, Traktionsverkehr, Begegnungsverkehr und Hub-Verkehr werden, wenn überhaupt, meist nur erwähnt. Im Traktionsverkehr sehen einige Quellen zumindest die Möglichkeit, solche Verkehre über eWays abzuwickeln und Wietschel, Gnann et al. (2017) sieht immerhin Traktionsdienstleistungen als ein mögliches Geschäftsmodell. Dessen Vorteile werden beschrieben und die Strecke ab der polnischen Grenze bis in die Beneluxstaaten wird als Einstieg in ein solches Modell vorgeschlagen.

Das Thema Betriebskosten, sowohl der HO-SZM als auch der HO-Strecken wird in den Forschungsberichten der in Kapitel 2 angeführten Institute ausführlich behandelt. Zu Frachterlösen und deren Zusammenhang mit den unterschiedlichen Betriebsmodellen finden sich keine konkreten Angaben, allenfalls der Hinweis, dass das Gewerbe unter großem Preisdruck steht und die Renditen, vor allem der reinen Frachtführerbetriebe, sehr gering sind.

Zu Klimawandel, zu CO₂-Ausstoß, zu Verursachern und Wegen zur CO₂-Vermeidung finden sich, auch im Zusammenhang mit dem Autoverkehr und speziell dem schweren LKW-Verkehr, zahlreiche Quellen. Die nachfolgenden komprimierten Tabellen zur Literaturrecherche (A.1 und A.2) gehen auf diesen Themenbereich daher nicht ein.

Tabelle A.1: Literaturrecherche Teil 1 (komprimierte Darstellung)

Autor	Jahr	Titel	Geschäfts- u. Betriebsmodelle	Tramperverkehr	Traktionsverkehr	Begegnungsverkehr	Hubverkehr	Systemverkehr	Frachtlöse / Rendite
Abraham, Sven; Ader, Sebastian; Karl, Alexander; Müller, Christian; Ruml, René	2017	Grenzen der Ladeinfrastruktur für Nutzfahrzeuge im innerstädtischen Betrieb unter Berücksichtigung erforderlicher spezifischer Aufwendungen zur Einrichtung der Ladeinfrastruktur: Projektarbeit						0	
Apfelstädt, Andy	2017	Handlungsoptionen im europäischen Ladungsverkehr	0	0			0		
Beckers, Thorsten; Gizzi, Florian; Jöhrens, Julius; Liedtke, Gernot	2019	Zentrale Ausgestaltungsfragen hinsichtlich eines Förderregimes für Oberleitungs-Hybrid-LKW (OH-Lkw) - Eine (institutionen-)ökonomische Analyse			0		0		0
Bernedeker, Tobias; Engwall, Mats; Hasselgren, Björn; Helms, Hinrich; Speiser, Jonas; Widegren, Fredrik	2020	Business Models, Ownership, and Financing Strategies	0						
Beutler, Felix; Brümmer, Ute; Ertner, Stephan; Evensen, Dirk; Obermaier, Ralph; Schroeder, Wolfgang	2021	Transformation der Automobilindustrie	0						
BGL Bundesverband Güterverkehr Logistik und Entsorgung e.V.	2017	Jahresbericht 2017	0						
BGL Bundesverband Güterverkehr Logistik und Entsorgung e.V.	2021	Klimaschutz in Logistik und Straßengüterverkehr							0
BGL Bundesverband Güterverkehr Logistik und Entsorgung e.V.	2024	Modellrechnung zur Kostenentwicklung im Güterkraftverkehr							0
Brandenburg, Hans; Dellke, Dorit; Waschlaw, Siegfried	2018	Güterverkehr - Spedition - Logistik	0	0				0	
BMW	2020	Verkehr in Zahlen 2020/2021							
Burghard, Uta; Scherrer, Aline	2020	BOLD Begleitforschung Oberleitungs-LKW in Deutschland: Der eHighway aus gesellschaftlicher Perspektive: Erkenntnisse zur sozialen Akzeptanz und den Akteuren rund um Oberleitungs-Lkw-Systeme in Deutschland und Europa	0						
Clausen, Uwe	2015	Die Zukunft der Logistik - Herausforderung und Chancen.	0		0				
Dabidian, Hooman	2012	Private Sector Development in Iraq	0					0	
Elbert, Ralf	2018	Zeifenstermanagement			0	0			
Göckeler, Katharina; Haase, Frank; Ziegler, Lukas	2022	Anforderungen der Logistikbranche an einen Umstieg auf klimaschonende Fahrzeugtechnologien	0						
Göckeler, Katharina; Hacker, Florian; Mottschall Moritz; Blanck, Ruth; Götz, Wolf; Kasten, Peter	2020	Status quo und Perspektiven alternativer Antriebstechnologien für den schweren Straßengüterverkehr	0				0	0	
Göhlich, Dietmar; Raab, Andreas F.	2021	Mobility2Grid - Sektorenübergreifende Energie- und Verkehrswende	0						
Hacker, Florian; Blanck, Ruth; Götz, Wolf	2020	StratON: Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge: Endbericht	0						
Hacker, Florian; Jöhrens, Julius; Plötz, Patrick	2020	BOLD Begleitforschung Oberleitungs-LKW in Deutschland: Wirtschaftlichkeit, Umweltwirkung und Ausbauszenarien von Oberleitungs-Lkw in Deutschland	0						0
Heicappell, Frederic; Wengelowski, Peter	2017	Entwicklung eines Kostenkalkulationsmodells für LKW-Ladungsverkehr unter Verwendung des Time-Driven Activity-Based Costing		0		0			

Tabelle A.2: Literaturrecherche Teil 2 (komprimierte Darstellung)

Autor	Jahr	Titel	Geschäfts- u. Betriebsmodelle	Trampverkehr	Traktionsverkehr	Begegnungsverkehr	Hubverkehr	Systemverkehr	Frachterlöse / Rendite
Jodlbauer, Herbert	2020	Geschäftsmodelle erarbeiten	0						
Jöhrens, Julius	2017	Roadmap-OH-Lkw_SlvOT-Analyse_aktualisiert	0						
Jöhrens, Julius et al.	2021	Connecting Countries by Electric Roads	0						
Kasten, Peter	2022	Szenarien und regulatorische Herausforderung für den Aufbau der Ladeinfrastruktur	0					0	
Kluschke, Philipp	2019	Alternative Antriebe im straßengebundenen Schwerlastverkehr		0					
Kopfer, Herbert; Kopfer, Heiko Wieland; Krajewska Marta Anna; Stache, Ulrich	2008	Strategien für die Auftragsdisposition in Speditionsunternehmen						0	
Kühnel, Sven; Hacker, Florian; Götz, Wolf	2018	Oberleitungs-Lkw im Kontext weiterer Antriebs- und Energieversorgungsoptionen für den Straßengüterfernverkehr: Ein Technologie- und Wirtschaftlichkeitsvergleich. Ein Technologie- und	0						
Kuhn, Eckart; Lange, Volker; Zimmermann, Peter	2011	Paletten-Management. Leitfaden für die Praxis	0						
Kunze, Oliver; Baumgärtel, Hartwig; Neumann, Andreas; Rosemeier, Sebastian	2012	Dynamic Truck Meeting (DTM): ein Prozess- & Schnittstellenstandard zur Realisierung von dynamischen Begegnungsverkehren mit Hilfe von Dispositions- und Telematik-Systemen. Band 1 (Prozess-Standard) u				0		0	0
Liedtke, Gernot	2020	Realistische Dekarbonisierungsoptionen für den Güterverkehr						0	
Lohre, Dirk; Pfenning, Roland; Poerschke, Viktoria; Gotthardt, Ruben	2015	Nachhaltigkeitsmanagement für Logistikdienstleister: Ein Praxisleitfaden				0		0	
Mars, August	1967	Autohöfe des Güterkraftverkehrs		0				0	
Mauer, Markus	2015	Autonomes Fahren	0			0		0	
Motta, Marco	2004	Simulation eines Regionallagerkonzeptes	0						
Mähle, Christian et al.	2016	Status Report 2016	0			0	0		
Müller, Stefanie; Klaus, Peter	2009	Die Zukunft des Ladungsverkehrs in Europa	0	0		0		0	0
Schmid, Kirsten	2007	Erfolgsfaktoren in Speditionen						0	0
Siemens AG	2016	ENUBA 2: Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen	0						
Technische Universität Darmstadt	2018	Zeitfenster-Management	0	0					
TransCare AG	2006	Einfluss der LKv-Maut							0
Vahlenkamp, Richard	2009	Trucking Europ						0	
Wietzschel, Martin; Gnann, Tilt; Kühn, André; Plötz, Patrick; Moll, Cornelius; Speth, Daniel	2017	Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw. Studie im Rahmen der wissenschaftlichen Beratung des BMWi zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie	0		0		0	0	
Zanker, Claus	2018	Branchenanalyse Logistik	0			0			
ZF Friedrichshafen AG	2004	ZF-Zukunftsstudie Fernfahrer 2.0		0		0			

A.5 Presseberichte

Mautsätze pro Kilometer ab 1. Dezember 2023 (in Cent/km)

für die CO₂-Emissionsklasse 1



Schadstoffklasse	Achse- und Gewichtsklasse	Mautsatz ALT	^{Neu} Mautsatz-Anteil für externe Kosten CO ₂ -Emissionen	Mautsatz NEU
Euro 6	7,5–11,99 t	9,8	8,0	17,8
	12–18 t	14,0	10,0	24,0
	>18 t bis 3 Achsen	18,1	12,4	30,5
	>18 t mit 4 Achsen	19,0	13,4	32,4
	>18 t ab 5 Achsen	19,0	15,8	34,8
Euro 5, EEV 1	7,5–11,99 t	12,8	8,0	20,8
	12–18 t	17,7	10,0	27,7
	>18 t bis 3 Achsen	22,1	13,4	35,5
	>18 t mit 4 Achsen	22,9	13,4	36,3
	>18 t ab 5 Achsen	22,9	16,0	38,9
Euro 4*	7,5–11,99 t	14,2	8,0	22,2
	12–18 t	18,8	10,0	28,8
	>18 t bis 3 Achsen	23,9	13,4	37,3
	>18 t mit 4 Achsen	25,4	13,4	38,8
	>18 t ab 5 Achsen	25,4	16,0	41,4
Euro 3*	7,5–11,99 t	17,1	8,0	25,1
	12–18 t	22,6	10,4	33,0
	>18 t bis 3 Achsen	29,3	13,8	43,1
	>18 t mit 4 Achsen	31,6	13,8	45,4
	>18 t ab 5 Achsen	31,6	16,2	47,8
Euro 2*	7,5–11,99 t	19,6	8,0	27,6
	12–18 t	24,6	10,4	35,0
	>18 t bis 3 Achsen	32,3	13,8	46,1
	>18 t mit 4 Achsen	34,9	13,8	48,7
	>18 t ab 5 Achsen	34,9	16,2	51,1
Euro 1, Euro 0	7,5–11,99 t	19,7	8,0	27,7
	12–18 t	24,8	10,4	35,2
	>18 t bis 3 Achsen	32,8	15,8	48,6
	>18 t mit 4 Achsen	35,4	15,8	51,2
	>18 t ab 5 Achsen	35,4	16,2	51,6

* Fahrzeuge mit Partikeleinwertungsklasse (PM₁₀) werden ab 1. Dezember 2023 nicht mehr in eine bessere Schadstoffklasse eingestuft. Zukünftig fallen Fahrzeuge mit der Schadstoffklasse Euro 3 + PM₁₀ 2* in die Maut-Schadstoffklasse 1, nicht mehr in die Maut-Schadstoffklasse 3. Für Fahrzeuge mit Euro 3 + PM₁₀ 2* gilt die Maut-Schadstoffklasse 3, nicht mehr die Maut-Schadstoffklasse 4.

für die Schadstoffklasse Euro 6

^{Neu} CO ₂ -Emissionsklasse	Achse- und Gewichtsklasse	Mautsatz ALT	^{Neu} Mautsatz-Anteil für externe Kosten CO ₂ -Emissionen	Mautsatz NEU
1	7,5–11,99 t	9,8	8,0	17,8
	12–18 t	14,0	10,0	24,0
	>18 t bis 3 Achsen	18,1	12,4	30,5
	>18 t mit 4 Achsen	19,0	13,4	32,4
	>18 t ab 5 Achsen	19,0	15,8	34,8
2	7,5–11,99 t	9,8	7,6	17,4
	12–18 t	14,0	9,6	23,6
	>18 t bis 3 Achsen	18,1	11,8	29,9
	>18 t mit 4 Achsen	19,0	12,8	31,8
	>18 t ab 5 Achsen	19,0	15,0	34,0
3	7,5–11,99 t	9,8	7,2	17,0
	12–18 t	14,0	9,0	23,0
	>18 t bis 3 Achsen	18,1	11,1	29,2
	>18 t mit 4 Achsen	19,0	12,0	31,0
	>18 t ab 5 Achsen	19,0	14,2	33,2
4	7,5–11,99 t	9,8	4,0	13,8
	12–18 t	14,0	5,0	19,0
	>18 t bis 3 Achsen	18,1	6,3	24,4
	>18 t mit 4 Achsen	19,0	6,8	25,8
	>18 t ab 5 Achsen	19,0	7,9	26,9

Abbildung A.3: Mauttabelle

Modellrechnung zur Kostenentwicklung im Güterkraftverkehr
– Einsatz im Fernbereich (national) –
von Juni 2023 bis Juni 2024

BITTE BEACHTEN SIE: Bei den dargestellten Veränderungen der Gesamtkosten handelt es sich um bloße Modellrechnungen, um einen groben Eindruck über Kostenveränderungen zu geben. Die tatsächliche Kostenstruktur und damit auch die jeweiligen Kostenveränderungen dürften sich hingegen von Betrieb zu Betrieb zum Teil deutlich unterscheiden.

Für die Erstellung einer betriebsindividuellen Rechnung steht Ihnen online der BGL Modellkostenrechner zur Verfügung:
[betriebsindividuelle Berechnung der Kostenentwicklung im Güterkraftverkehr](https://www.bgl-ev.de/wesider_bgl/informationen/branchenkostenentwicklung.html)

Kostengruppe	Kostenart	Veränderung in %	Kostenstruktur 2023 durchschnittl. Anteil der Kostenart an den Gesamtkosten	Kostengruppe Veränderung in %	Gesamtkosten Veränderung in %
Personalkosten Fahrer¹⁾ ohne Spesen	Lohn	+6,63	21,83		
	gesetzliche Sozialaufwendungen	+7,19	5,17	-6,63	
	sonstige	+2,21	0,89		
Fahrerspesen²⁾	Fahrerspesen	0,00	2,56	0,00	
Fahrzeugwertschöpfungskosten (km-abhängige Leistungskosten)	km-abhängige Abschreibung	+1,50	3,66		
	Kraftstoffkosten	+9,08	23,30		
	Kosten zuzügl. Betriebsmittel (Hemstoff)	-9,20	0,39		
	Schmierstoffkosten	-4,31	0,52		
	Wartungs- und Reparaturkosten	+8,92	4,23	-21,63	
	Fzg.-Reinigungskosten (Außenreinigung)	-0,30	0,51		
	Reifenkosten	-2,00	1,60		
	km-bezogene Straßenbenutzungsgebühren ³⁾	+79,86	17,64		+13,11
	sonstige Einsatzkosten	-1,67	0,27		
Fahrzeugverhaltenskosten (Fixkosten)	zeitabhängige Abschreibung	+1,50	3,66		
	Fremdfinanzierungskosten	+8,07	1,52		
	Prüfgebühren	+6,50	0,20		
	zeitbezogene Straßenbenutzungsgebühren	0,00	0,00	-3,88	
	Kfz.-Steuer	0,00	0,37		
	Versicherungen	+8,40	2,53		
	sonstige Fixkosten ⁴⁾	-1,67	1,34		
Verwaltungskosten (Gemeinkosten)	Personalkosten	+6,63	4,22	+4,56	
	Sachkosten	+2,21	3,60		

1) inklusive Fahrpersonalselbstschätzung; 2) Pauschbeträge für Verpflegungsmehraufwendungen bei auswärtiger beruflicher Tätigkeit; 3) Bestimmung der Durchschnittsmenge anhand der Musterstellen des BAUM bei Änderung der Musterstelle sowie unter Berücksichtigung von Erweiterungen des durchschnittlichen Straßennetzes (mindestens jedoch einmal pro Jahr – Bezugsmonat Dezember); 4) inklusive einseitige Kosten (einzellige ANHANG, WB).

Quellen: Statistisches Bundesamt, Wiesbaden; CDP CompensationPartner GmbH, Hamburg; JOBWATCH.ME GmbH, Hamburg; KRWAG, Hamburg; Deutsche Bundesbank, Frankfurt am Main; eigene Erhebungen.

Alle Informationen im Rahmen des Kosteninformationssystems des BGL – Keine Gewähr für die Richtigkeit der Angaben und Ergebnisse.

© Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung (BGL) e.V. E-Mail: info@bgl-ev.de Internet: www.bgl-ev.de Nutzung und Vervielfältigung nur mit Quellenangabe gestattet. Die kommerzielle Vervielfältigung ist untersagt.

Hinweise: https://www.bgl-ev.de/wesider_bgl/informationen/branchenkostenentwicklung.html

B Fahrzeugkalkulation mittels Plankosten					
	Motorwagen	Anhänger	Lastzug		
Variable Kosten:	€/ km	€/ km	€/ km	€/ Jahr	%
36 variabler Anteil AfA/Leasingkosten	0,02	0,00	0,03	2.917	2,2
37 Treibstoffkosten	0,25		0,25	27.216	20,1
38 Schmierstoffkosten	0,01		0,01	600	0,4
39 Reifenkosten	0,01	0,01	0,02	2.237	1,7
40 Fremdrepaturkosten	0,05	0,03	0,08	8.400	6,2
41 Eigenrepaturkosten	0,00	0,00	0,00	2	0,0
42 Wartungs-/Service-Vertragskosten	0,00	0,00	0,00	0	0,0
43 sonstige variable Kosten	0,02	0,00	0,02	2.800	1,9
44 sonstige variable Kosten	0,00	0,00	0,00	0	0,0
45 Summe variable Kosten			0,41	43.972	32,6
Fahrtpersonalkosten			€/ Tag	€/ Jahr	%
46 Jahresbruttolöhne Fahrer			139	35.040	25,9
47 Sozialversicherungsaufwand			34	8.571	6,3
48 Fahrerspesen			18	4.536	3,4
49 sonstige Fahrtpersonalkosten			4	1.000	0,7
50 sonstige Fahrtpersonalkosten			0	0	0,0
51 Summe Fahrtpersonalkosten			195	49.147	36,4
Feste Fahrzeugkosten	€/ Tag	€/ Tag	€/ Tag	€/ Jahr	%
52 fixer Anteil AfA/Leasingkosten	40	11	51	12.849	9,5
53 Verzinsung Anlagevermögen	27	0	27	6.720	5,0
54 Verzinsung Umlaufvermögen	4		4	900	0,7
55 Kfz-Steuer	6	0	6	1.401	1,0
56 Kfz-Haftpflichtversicherung	26	0	27	6.691	5,0
57 Kfz-Kaskoversicherung	11	3	14	3.451	2,6
58 Güterschaden-/Logistikversicherung	2		2	400	0,3
59 Autobahngeld Inland	0		0	1	0,0
60 Autobahngeld Ausland	0		0	1	0,0
61 überzählige Anhänger/Auflieger		0	0	1	0,0
62 sonstige feste Kosten	0	0	0	2	0,0
63 sonstige feste Kosten	0	0	0	2	0,0
64 sonstige feste Kosten	0	0	0	2	0,0
65 Summe Feste Kosten			129	32.421	24,0
66 Kalkulationssätze - Summe Teilkosten	€/ km	€/ Tag	€/ Jahr		
	0,41	324	125.540	82,9	
Gemeinkosten			€/ Tag	€/ Jahr	%
67 Allgemeine Verwaltungskosten			33	8.328	6,2
68 kalkulatorische Geschäftsleitungskosten			0	1	0,0
69 Unternehmerialsko			0	1	0,0
70 sonstige Gemeinkosten			5	1.200	0,9
71 sonstige Gemeinkosten			0	0	0,0
72 Summe Gemeinkosten			38	9.530	7,1
73 Kalkulatorischer Fahrzeuggewinn			0	1	0,0
74 Kalkulationssätze - Summe Vollkosten	€/ km	€/ Tag	€/ Jahr		
	0,41	362	135.071	100,0	

Abbildung A.5: Gemeinkostenanteil laut SVG

DER MURGTÄLER

SAMSTAG, 23. JANUAR 2021

Weltweit einzigartiges Projekt

Wasserstoff-/Brennstoffzellen-Lkw ab 2023 im Probebetrieb auf eWayBW-Strecke

Von Stephan Juch

Murgtal – Die B 462 wird Schauplatz eines Vergleichs klimafreundlicher Technologien: Die Iveco Magirus AG bereichert mit einem Wasserstoff-/Brennstoffzellen-Lkw vom Typ Nikola TRE die im Sommer in Betrieb gehende Teststrecke für Oberleitungs-Lkw (eWayBW) und stellt einen Prototyp für den Technologievergleich im Murgtal zur Verfügung. Die Erprobung erfolgt im Rahmen der Testphase bis zum Jahr 2024.

Mit der Einbindung eines solchen Lasters in eWayBW „ist es gelungen, die entsprechenden alternativen Antriebstechnologien für schwere Nutzfahrzeuge in einem Projekt zu vereinen“, freute sich Verkehrsminister Winfried Hermann (Grüne) gestern bei der virtuellen Präsentation des Vorhabens und betonte: „Nun besteht die Chance, Oberleitung, Brennstoffzellen/Wasserstoff, batterieelektrische Antriebe und Hybride mit reFuels im Realbetrieb direkt miteinander zu vergleichen – das ist einzigartig, weltweit!“

Hermann zeigte sich angesichts der zukunftsweisenden Erprobung klimafreundlicher Antriebe des schweren Güterverkehrs auf der Bundesstraße durch das Murgtal „erstaus über den Widerstand“, den es vor Ort nach wie vor gebe. Zudem sei die großen Sorgen vor einem Verkehrschaos durch die Baustelle zur Einrichtung der Infrastruktur bislang als unbegründet erwiesen hätten. Auch die Vorhaltungen der Kritiker, die Oberleitungstechnologie sei veraltet, teile weder

sein Ministerium, noch die Wissenschaft, die ein sehr großes Interesse an eWayBW und der Begleitforschung habe, so Hermann.

Das bestätigte Dr. Gerrit Marx (Iveco Magirus AG): „Wir freuen uns über diesen breiten technologieoffenen Feldversuch konkurrierender klimaneutraler Antriebe praktisch vor unserer Haustüre in Ulm. Klimaneutrale Realität in Serie heute ist ein mit flüssigem Bio-Methan betriebener Schwerlast, mautbefreit bis Ende 2025. Die Zukunft wird nun bereichert mit Null-Emissions-Lkw. Die Erfahrungen in diesem Realbetrieb werden das nächste Kapitel schreiben.“

Neben den ursprünglich vorgesehenen fünf Oberleitungs-Hybrid-Lkw (mit Diesel und Elektroantrieb) werden bei eWayBW ein reiner Elektro-Lkw der Daimler Truck AG, der Wasserstoff-/Brennstoffzellen-Lkw von Iveco sowie ein vom Land Baden-Württemberg

Der Iveco-Lkw vom Typ Nikola TRE (Variante FCEV, Brennstoffzelle) wird auf der B 462 im Murgtal getestet und einem wissenschaftlichen Vergleich mit der Oberleitungstechnologie unterzogen.

Foto: IVECO



aufgebauter Oberleitungs-Elektro-Lkw eingesetzt. Mit der Nutzung synthetischer Kraftstoffe (reFuels) in den Oberleitungs-Hybrid-Lkw kommen damit alle möglichen Optionen für einen klimafreundlichen Straßenverkehr zum Einsatz. Sie kommen in der Werkslogistik der Papierfabriken in Oberrösch zur Anwendung.

Erfolgversprechende Ansätze im Vergleich

„So können alle erfolgversprechenden Ansätze zur dringend notwendigen Dekarbonisierung erstmals unter realen und gleichen Bedingungen in der Praxis erprobt und unmittelbar miteinander verglichen werden“, unterstreicht das Verkehrsministerium. Auch wenn es sich bei den eingesetzten Fahrzeugen jeweils um Prototypen oder Vorserienfahrzeuge handelt, können damit bereits die bisherigen theoretischen

Überlegungen und Studien klimafreundlicher Antriebe verifiziert werden. Dadurch ergeben sich Hinweise, unter welchen Bedingungen die jeweiligen Technologien am besten eingesetzt werden können.

„Mit dem Einsatz des Brennstoffzellenfahrzeugs bekommen wir einen vollständigen Systemvergleich. Mehr Informationen wie auf dieser Strecke und in diesem Einsatzbereich können derzeit in der Praxis nicht gesammelt und ausgewertet werden“, begrüßt auch der Gernsbacher Landtagsabgeordnete Thomas Hentschel (Grüne) die neue Entwicklung bei eWayBW, das einen bedeutenden Beitrag für wirksamen Klimaschutz leistet: „Das ist wichtig für eine gute wissenschaftliche Bewertung der verschiedenen Antriebstechniken. Dadurch beweisen wir Technologieoffenheit und Innovationsfreude“, sagt der Sprecher für E-Mobilität der Grünen Landtagsfraktion.

Abbildung A.6: Brennstoffzellen-LKW auf eWayBW angekündigt



Abbildung A.7: SZM von IVECO mit Brennstoffzellenantrieb (03.11.2024 am eWayBW)

500 Kilometer ohne einmal aufzuladen?

Österreicher stellen ersten E-Lkw vor



Auf der IAA Transportation in Hannover sorgte der österreichische Fahrzeughersteller Steyr Automotive für Aufsehen: Mit dem eTopas 600 stellte das Unternehmen einen E-Lkw vor, der sich als ernsthafter Konkurrent für den Volvo FH Electric und den Tesla Semi positioniert. Entwickelt in Zusammenarbeit mit dem chinesischen Technologieunternehmen SuperPanther wurde der Lkw speziell für den europäischen Markt konzipiert, heißt es in einer Pressemitteilung von Steyr Automotive.

1. eTopas 600: Der neue E-Lkw im Überblick

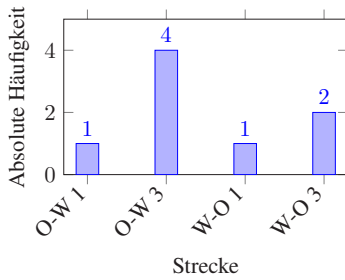
Der eTopas 600 ist mit leistungsstarken **LFP-Batterien** ausgestattet, die eine Kapazität von 621 kWh bieten. Dieser große Akku ermöglicht dem E-Lkw eine Reichweite von bis zu 500 Kilometern. Die technischen Daten entsprechen exakt denen des eActros 600 von Mercedes, der ebenfalls mit LFP-Zellen des Batterieherstellers CATL arbeitet. Ähnlich wie das Modell von Mercedes basiert auch der eTopas 600 auf einer Hochvolt-Architektur von 876 Volt.

Angetrieben wird der eTopas 600 von zwei leistungsstarken Elektromotoren, die zusammen eine **Gesamtleistung von 692 Kilowatt** erreichen. Besonders

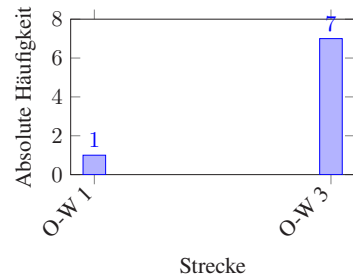
Abbildung A.8: eTopas 600 von Steyer

A.6 Oberleitungsnetze

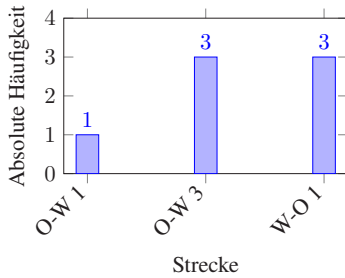
Die nachfolgenden Diagramme zeigen für 2-stellige PLZ-Gebiete wie oft ein eWay getroffen wird.



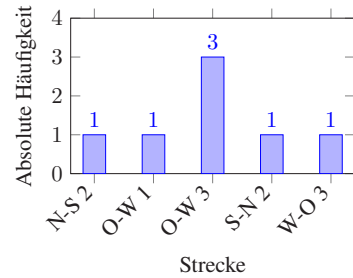
(a) PLZ 01



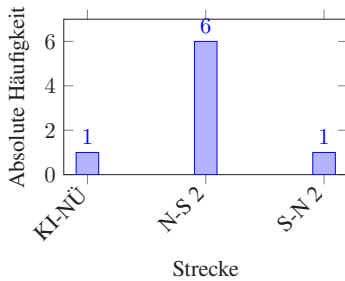
(b) PLZ 02



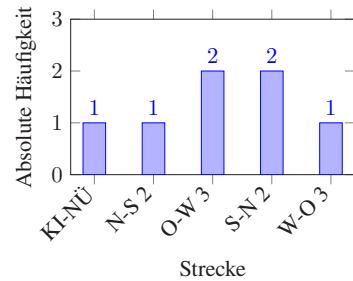
(c) PLZ 03



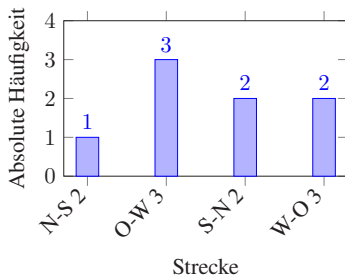
(d) PLZ 04



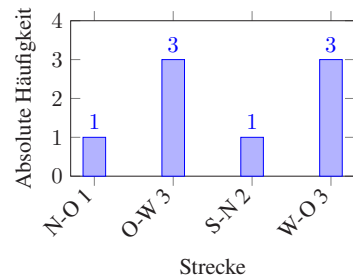
(e) PLZ 06



(f) PLZ 07

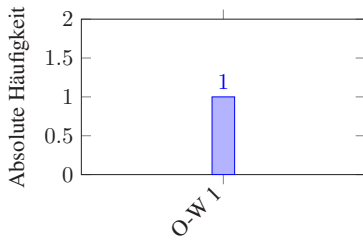


(g) PLZ 08

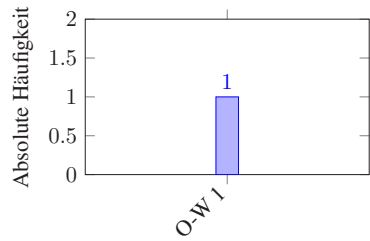


(h) PLZ 09

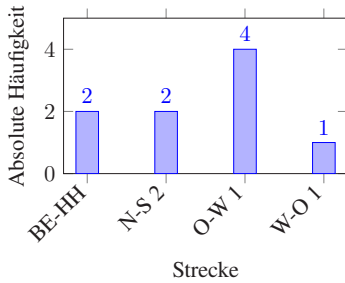
Abbildung A.9: Verteilung der Strecken für Postleitzahlgebiet 0



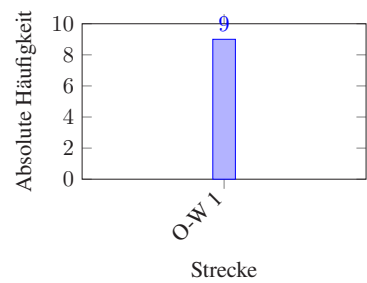
(a) PLZ 12



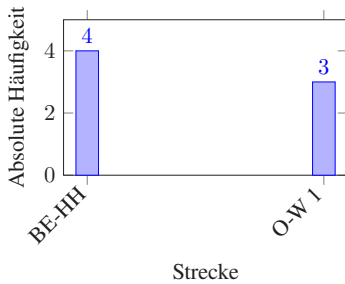
(b) PLZ 13



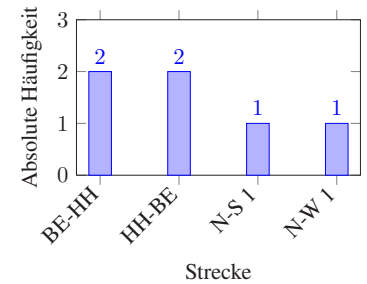
(c) PLZ 14



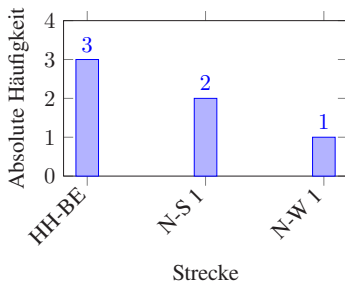
(d) PLZ 15



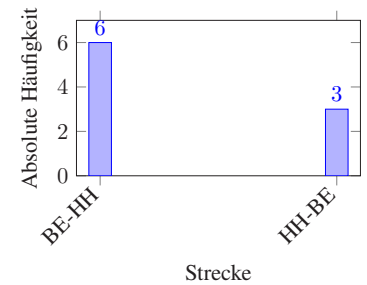
(e) PLZ 16



(f) PLZ 17

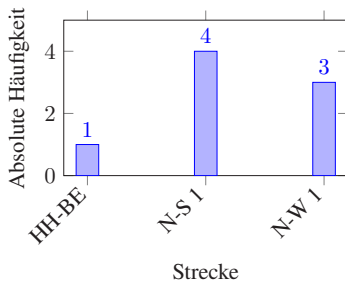


(g) PLZ 18

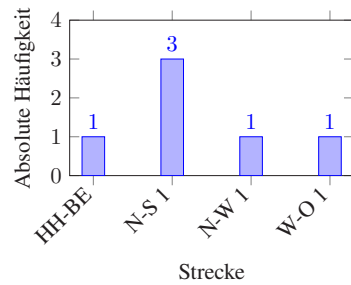


(h) PLZ 19

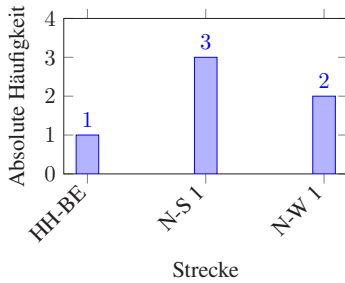
Abbildung A.10: Verteilung der Strecken für Postleitzahlgebiet 1



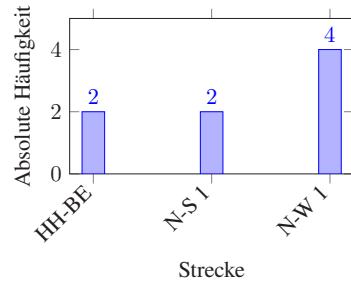
(a) PLZ 20



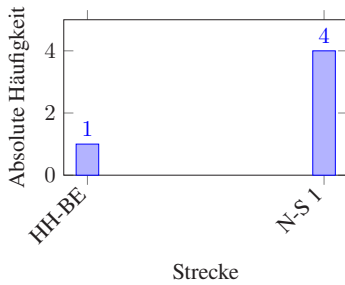
(b) PLZ 21



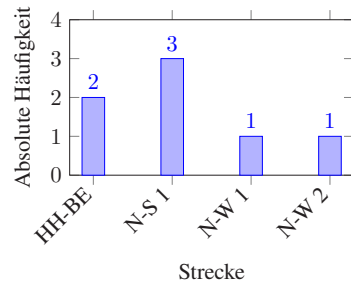
(c) PLZ 22



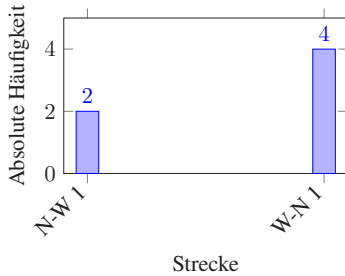
(d) PLZ 23



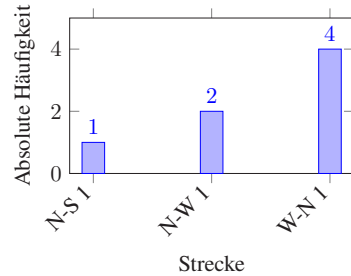
(e) PLZ 24



(f) PLZ 25

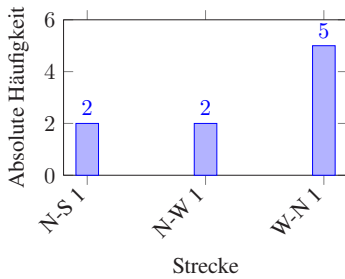


(g) PLZ 26

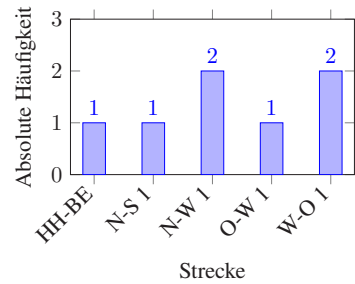


(h) PLZ 27

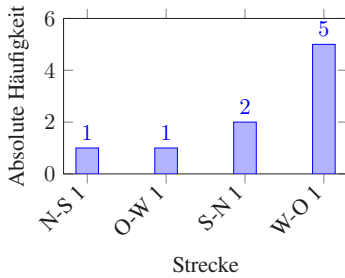
Abbildung A.11: Verteilung der Strecken für Postleitzahlgebiete 20-27



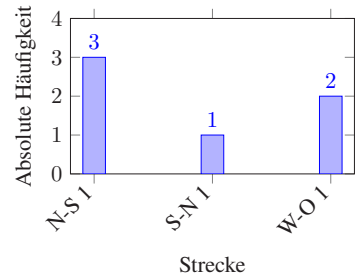
(a) PLZ 28



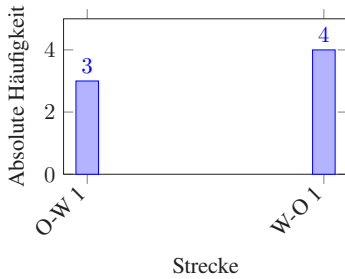
(b) PLZ 29



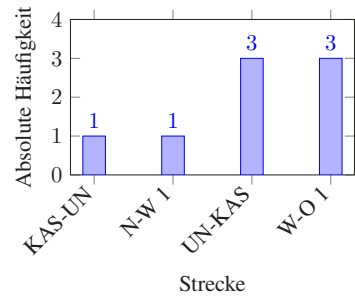
(c) PLZ 30



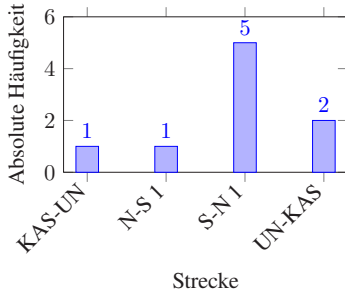
(d) PLZ 31



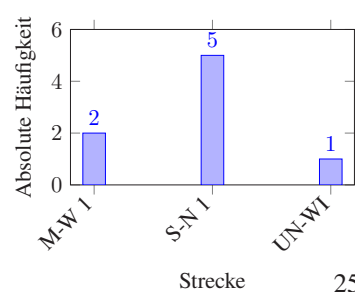
(e) PLZ 32



(f) PLZ 33

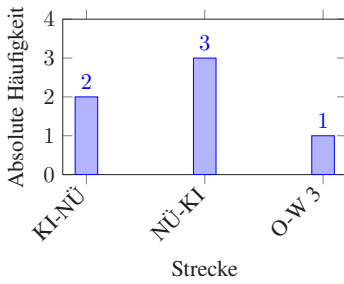


(g) PLZ 34

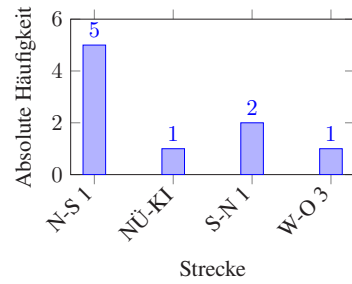


(h) PLZ 35

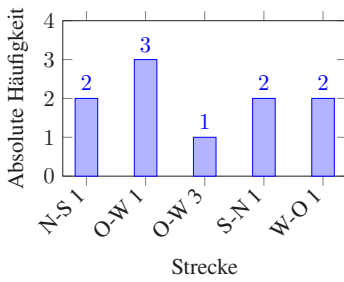
Abbildung A.12: Verteilung der Strecken für Postleitzahlgebiete 28-35



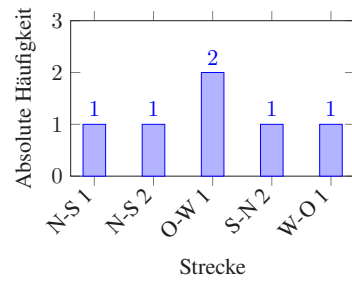
(a) PLZ 36



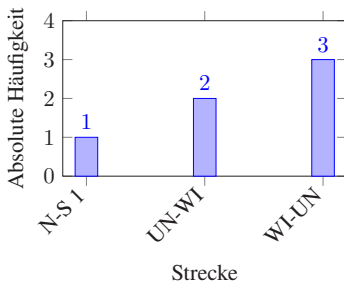
(b) PLZ 37



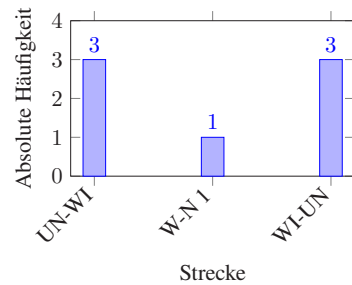
(c) PLZ 38



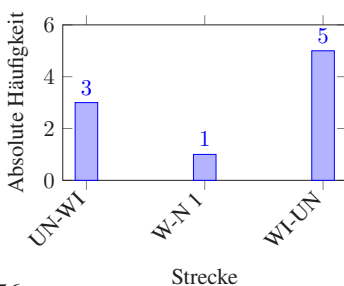
(d) PLZ 39



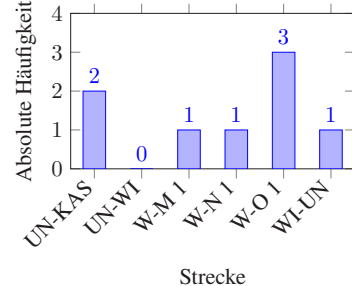
(e) PLZ 40



(f) PLZ 41

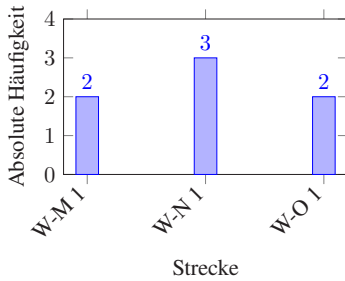


(g) PLZ 42

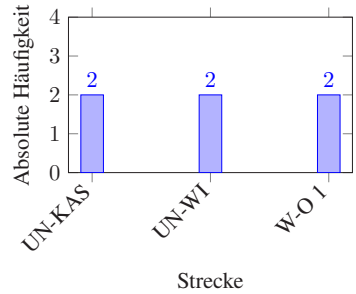


(h) PLZ 44

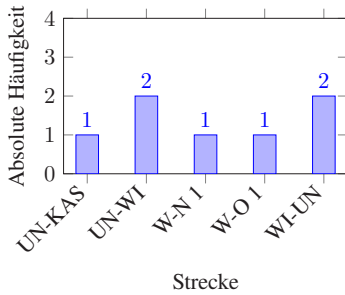
Abbildung A.13: Verteilung der Strecken für Postleitzahlgebiete 36-44



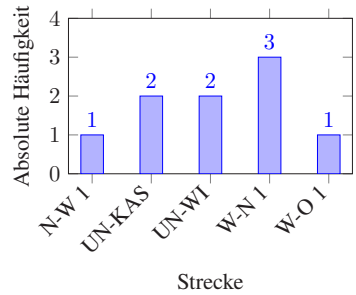
(a) PLZ 45



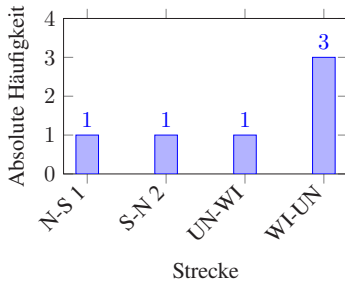
(b) PLZ 46



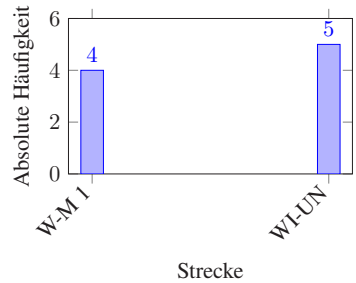
(c) PLZ 47



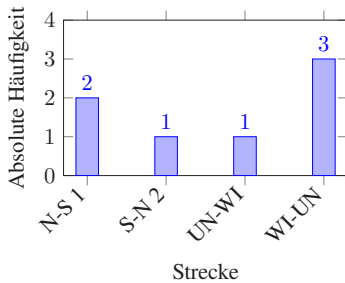
(d) PLZ 48



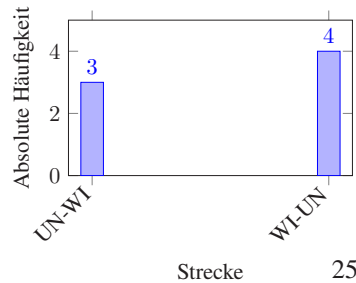
(e) PLZ 50



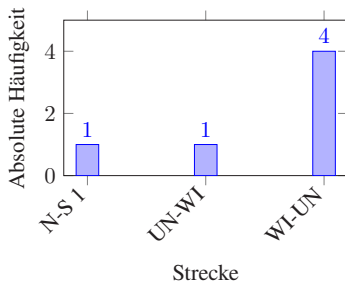
(f) PLZ 51



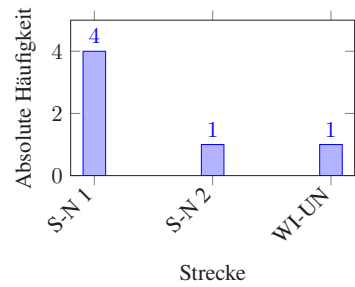
(g) PLZ 52



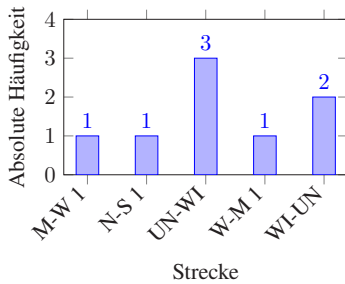
(h) PLZ 53



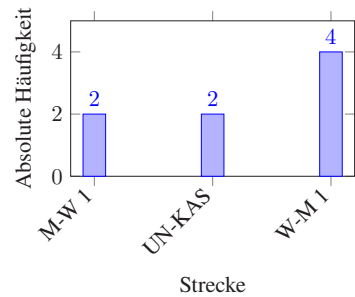
(a) PLZ 54



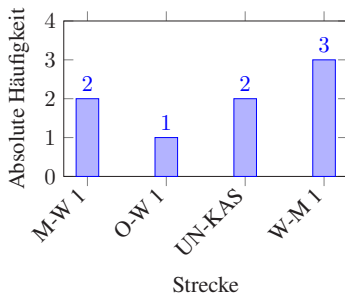
(b) PLZ 55



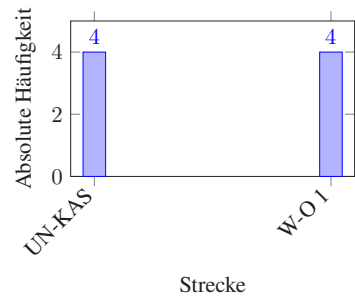
(c) PLZ 56



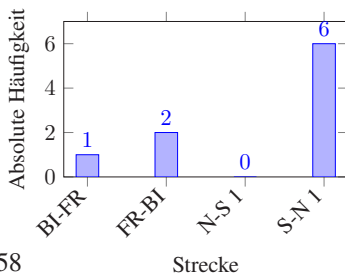
(d) PLZ 57



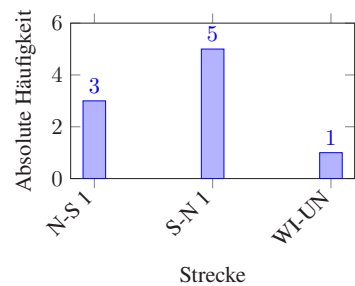
(e) PLZ 58



(f) PLZ 59

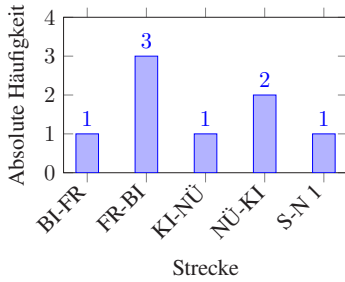


(g) PLZ 60

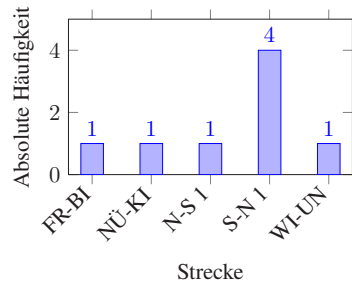


(h) PLZ 61

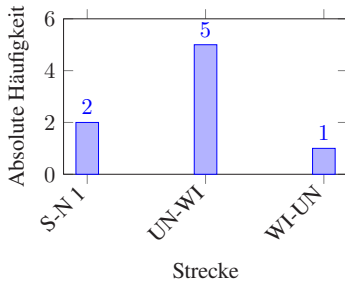
Abbildung A.15: Verteilung der Strecken für Postleitzahlgebiete 54-61



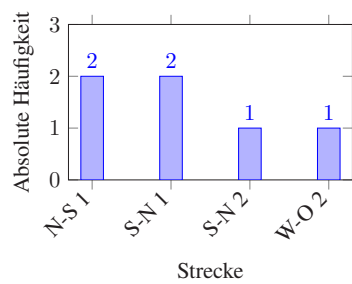
(a) PLZ 63



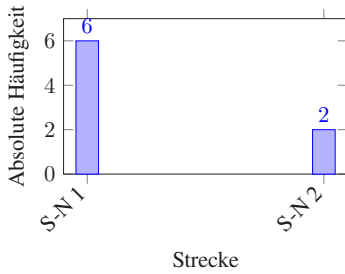
(b) PLZ 64



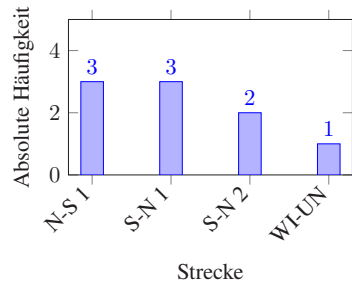
(c) PLZ 65



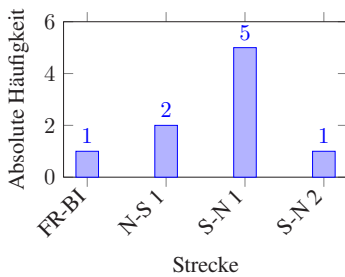
(d) PLZ 66



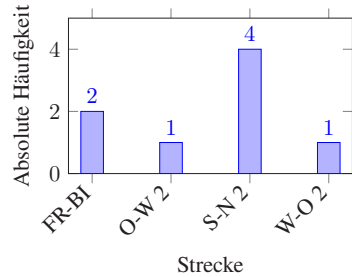
(e) PLZ 67



(f) PLZ 68

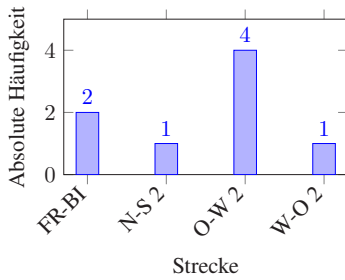


(g) PLZ 69

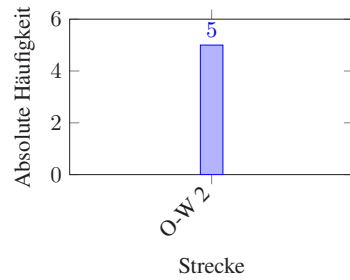


(h) PLZ 70

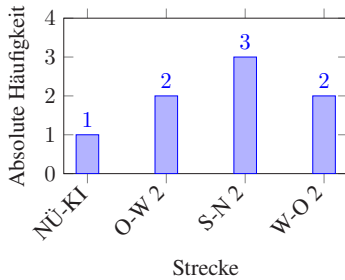
Abbildung A.16: Verteilung der Strecken für Postleitzahlgebiete 63-70



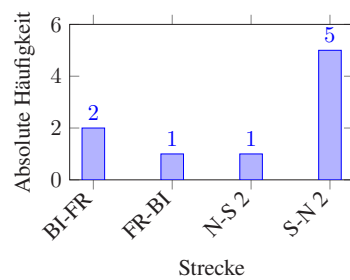
(a) PLZ 71



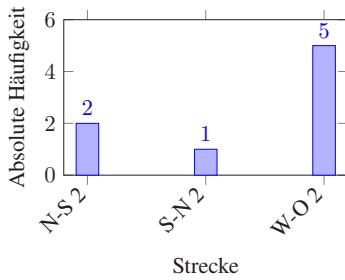
(b) PLZ 72



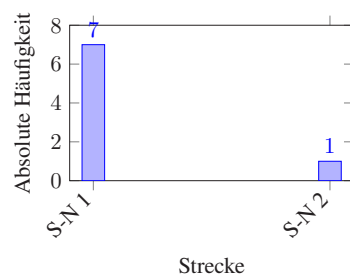
(c) PLZ 73



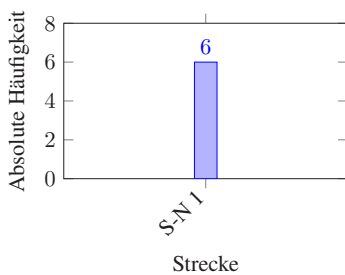
(d) PLZ 74



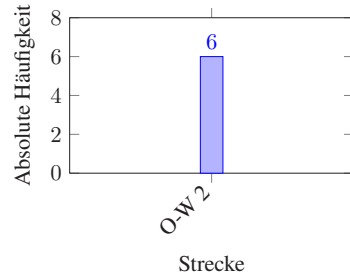
(e) PLZ 75



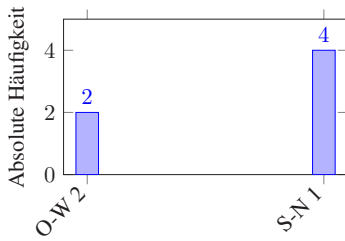
(f) PLZ 76



(g) PLZ 77

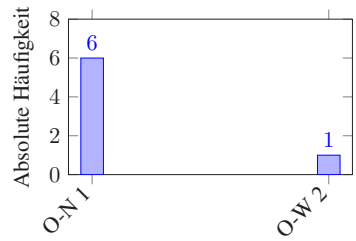


(h) PLZ 78



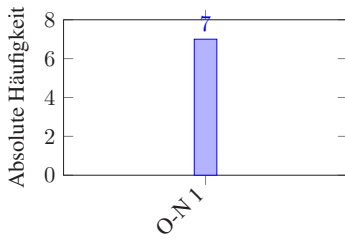
Strecke

(a) PLZ 79



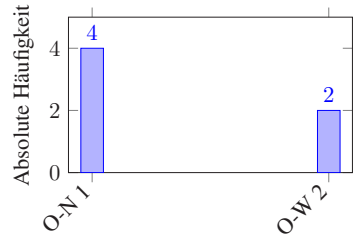
Strecke

(b) PLZ 80



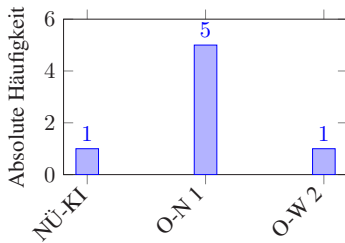
Strecke

(c) PLZ 81



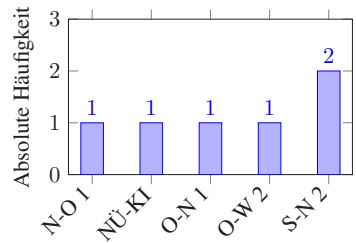
Strecke

(d) PLZ 82



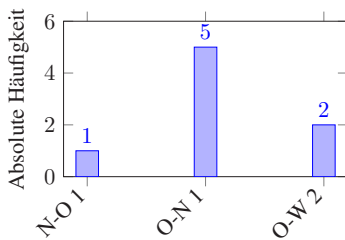
Strecke

(e) PLZ 83



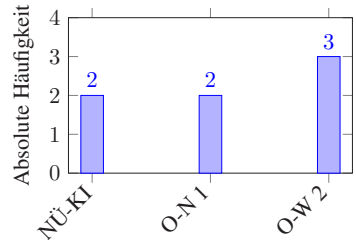
Strecke

(f) PLZ 84



Strecke

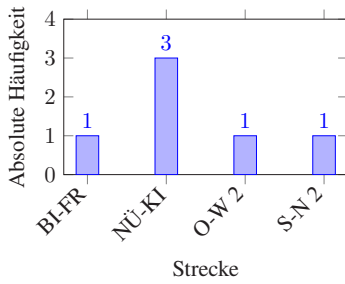
(g) PLZ 85



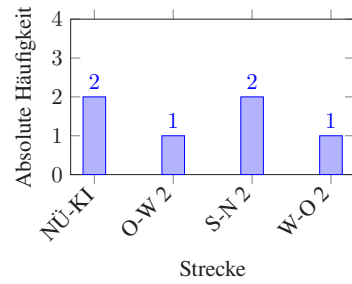
Strecke

(h) PLZ 86

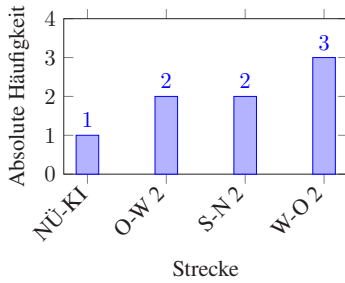
Abbildung A.18: Verteilung der Strecken für Postleitzahlgebiete 79-86



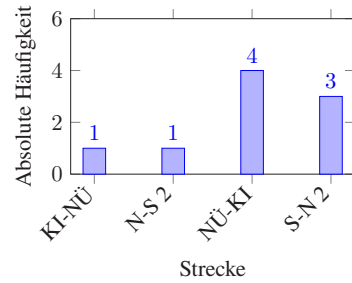
(a) PLZ 87



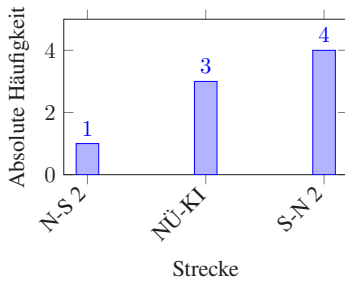
(b) PLZ 88



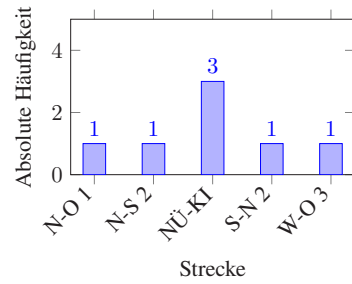
(c) PLZ 89



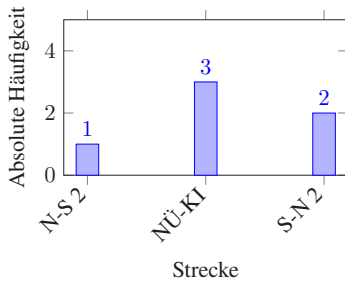
(d) PLZ 90



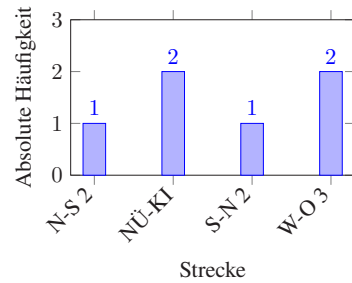
(e) PLZ 91



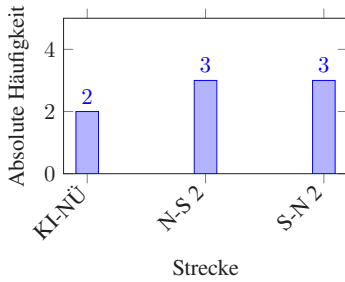
(f) PLZ 92



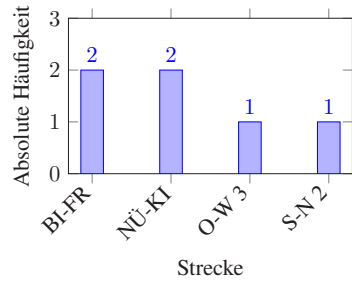
(g) PLZ 93



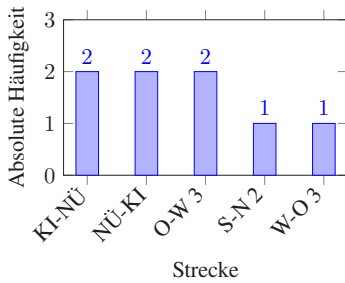
(h) PLZ 94



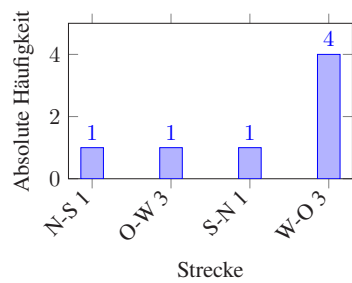
(a) PLZ 95



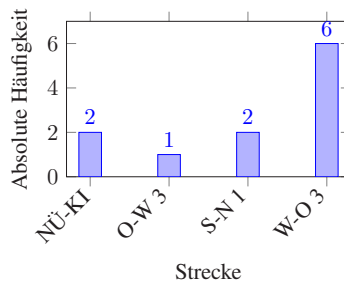
(b) PLZ 96



(c) PLZ 97



(d) PLZ 98



(e) PLZ 99

Abbildung A.20: Verteilung der Strecken für Postleitzahlgebiete 95-99

Tabelle A.3: eWay Elektrokilometer in beiden Richtungen

E-Strecke	Elektrostrecken [km] an der gesamten Fahrstrecke abgehend aus PLZ-Gebiet									
	PLZ 00	PLZ 10	PLZ 20	PLZ 30	PLZ 40	PLZ 50	PLZ 60	PLZ 70	PLZ 80	PLZ 90
N-S 1	544	3099	6427	2992	1163	759	300	0	0	384
S-N 1	579	91	0	3108	284	1593	8993	10031	3612	2678
Summe	1124	3190	6427	6100	1447	2352	9293	10031	3612	3062
N-W 1	62	642	2360	135	86	0	0	0	17	13
W-N 1	0	0	461	0	1884	1638	199	19	262	343
Summe	62	642	2821	135	1970	1638	199	19	278	356
N-S 2	2339	6789	1318	536	8	190	8	101	0	812
S-N 2	1562	0	86	179	35	1087	2126	5023	5304	4952
Summe	3902	6789	1404	715	43	1277	2134	5125	5304	5764
N-O 1	484	260	129	622	242	230	236	105	19	165
O-N 1	0	0	0	0	0	0	0	0	3219	0
Summe	484	260	129	622	242	230	236	105	3238	165
M-W 1	67	0	95	79	0	85	122	291	5	234
W-M 1	0	0	165	0	692	986	0	0	0	0
Summe	67	0	261	79	692	1071	122	291	5	234
O-W 1	2013	2622	264	807	0	55	65	34	301	620
W-O 1	179	58	1860	2711	4799	3787	418	249	177	284
Summe	2192	2680	2124	3518	4799	3841	483	283	478	904
O-W 2	48	0	0	25	0	0	0	316	1698	35
W-O 2	2	56	78	62	809	739	525	689	136	0
Summe	50	56	78	87	809	739	525	1005	1834	35
O-W 3	2791	501	0	40	0	0	0	0	30	379
W-O 3	404	60	137	807	506	1436	1523	514	66	1064
Summe	3196	561	137	846	506	1436	1523	514	96	1443
BE-HH	370	1028	0	61	0	0	95	129	238	438
HH-BE	7	619	1433	126	30	175	105	67	0	39
Summe	377	1647	1433	188	30	175	200	195	238	477
BI-FR	24	0	0	0	0	0	8	2	546	400
FR-BI	0	0	0	95	675	795	773	332	14	0
Summe	24	0	0	95	675	795	781	335	560	400
KAS-UN	280	0	0	26	123	0	132	174	713	946
UN-KAS	0	0	75	417	1599	957	0	0	0	0
Summe	280	0	75	443	1722	957	132	174	713	946
KI-NÜ	33	0	1911	2775	1145	1191	424	68	0	74
NÜ-KI	198	0	0	141	0	0	364	2273	5053	2881
Summe	231	0	1911	2916	1145	1191	787	2341	5053	2955
UN-WI	2	0	255	101	1886	463	203	0	0	0
WI-UN	46	49	0	15	379	1892	978	341	129	0
Summe	48	49	255	116	2266	2355	1181	341	129	0
Gesamt summe	12036	15874	17055	15861	16347	18058	17597	20760	21539	16741

Abbildungsverzeichnis

1.1	Globale CO ₂ -Emissionen	2
1.2	Treibhausgase, Anteil am Gesamtausstoß in Deutschland (Quelle:UBA,2022)	3
1.3	Emissionsgrenzwerte für LKW-Dieselmotoren	4
1.4	Anteil des Verkehrssektors an den Treibhausgasemissionen	5
1.5	LKW-Bestand in Deutschland	6
1.6	PKW-Neuzulassungen in Deutschland nach Antriebsart	7
1.7	Anzahl von LKW mit alternativen Antrieben	8
1.8	Gliederzug (www.rollerreiner.de)	13
1.9	Sattelzug (www.rollerreiner.de)	13
1.10	Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung	15
1.11	Stromtrasse Suedlink (Quelle: www.suedlink.com)	18
1.12	Stromnachfrage 2030 im Vergleich zu 2018 Quelle: Prognos AG) . .	19
1.13	Tankstellenpreis am 27.05.2024 für AdBlue und HVO100	23
2.1	Das System eHighway (nach Siemens Mobility)	25
2.2	HO-SZM schematisch (aus Bühs.2023)	29
2.3	HO-SZM von Scania	30
2.4	Standardtrailer der Firma Krone (Quelle: www.krone-trailer.com) . .	30
2.5	Pantograf mit 2 Gleitstücken (Quelle: Siemens.2012)	31
2.6	Pantograf mit Basisstation hinter dem Fahrerhaus	32
2.7	E-Ladepark von Daimler Truck und Netze BW	37
2.8	HO-LKW auf eHighway ELISA in Hessen. (Quelle: https://www.autobahn.de/planen-bauen/projekt/e-highway) .	41
2.9	HO-LKW auf eHighway FESH in Schleswig-Holstein (Quelle: https://ehighway-sh.de/forschung/)	42
2.10	eWayBW auf Bundesstraße B462	43
2.11	Geplante Electric Road Systems (ERS) in den Niederlanden	44

2.12	eWay Ausbaustufe 1 und kleines Hub-Netz. (Quelle: Satlog, eigene Darstellung)	46
2.13	eWays der Ausbaustufe 3 und 4. (Quelle: Satlog)	48
2.14	Unterbrechung des eWay durch Autobahnanschlüsse (Quelle: Satlog GmbH, Weinheim)	49
2.15	Alternative Routen (Quelle: Google Maps)	52
2.16	eWay-Strecken in Ausbaustufe 4	60
2.17	PLZ-Gebiete Deutschland (Quelle: www.alamy.com)	63
2.18	Zu- und Ablauf im Traktionsverkehr	65
2.19	Entfernung zum nächsten eWay (PLZ-Gebiete 0 bis 5)	66
2.20	Entfernung zum nächsten eWay (PLZ-Gebiete 6 bis 9)	67
3.1	Einteilung nach Gewichtsklassen und Aufbauten	74
3.2	Standardisierte Lademittel Bahn-Gitterbox und Euro-Palette (Quelle: DB-Schenker und EPAL)	75
3.3	Mautsysteme in Europa (Quelle: impargo SVG)	83
3.4	Trampverkehr	85
3.5	Frachterlös abhängig von Be- und Entladebedingungen	89
3.6	Zweitagesfahrt	90
3.7	Traktionsverkehr zwischen 2 Umschlagpunkten (Short Haul)	91
3.8	Traktionsverkehr ersetzt Trampverkehr	92
3.9	Gewichtsklassen und Aufbauten	96
3.10	Trailerstellplätze am Umschlagpunkt	97
3.11	Traktionsverkehr mit 3 Umschlagpunkten	98
3.12	Transport Deutschland – Ungarn	101
3.13	Protokoll zu Transport Deutschland – Ungarn	101
3.14	Transport Bochum – Valencia (Quelle: IMPARGO GmbH)	102
3.15	Systemverkehre	104
3.16	Zentral-Hubs in der Mitte Deutschlands	107
3.17	Hub-Netz klein	108
3.18	Hub-Netz groß	109
3.19	Begegnungsverkehr mit Sattelzügen	111
3.20	Logo der Kombiverkehr Deutsche Gesellschaft für kombinierten Güterverkehr GmbH & Co	113
3.21	Wechselbrücken und Sattelzüge im Kombiverkehr (Quelle: Hellertal Startbilder.de)	114

3.22	Kombiverkehr Verbindung Ludwigshafen–Hannover	115
4.1	Streckenanteile im Trampverkehr	124
4.2	Streckenanteile im Traktionsverkehr	125
4.3	Beispiele für Ermittlung der Anzahl von SZM im Trampmodell . . .	129
4.4	Beispiele für Ermittlung der Anzahl von SZM im Traktionsmodell .	131
5.1	Einfluss von Nutzlastverlust auf C_{sys} und SSA	140
5.2	Einfluss der Parameter FA_{trak} , FA_{ho} und FN_{ho}	142
5.3	Mit Full Truck Load unterwegs	147
5.4	Zahl Be- und Entladestellen in Abhängigkeit von den Faktoren A (Entfernung), B (Geschwindigkeit) und C (Verweildauer) bei Vor- und Nachläufen.	147
5.5	Frachterlös in Abhängigkeit von den Faktoren A (Entfernung), B (Geschwindigkeit) und C (Verweildauer) bei Vor- und Nachläufen	149
5.6	SSA in Relation zum Dieselantrieb	150
5.7	SSA im Vergleich von Tramp- zu Traktionsverkehr	150
5.8	Aufteilung der Systemkosten C_{sys}	153
5.9	Einfluss von PC_{cert} auf C_{sys}	154
5.10	Relative Beziehungen der Systemkosten C_{sys} in Abhängigkeit vom Preis der CO_2 -Zertifikate PC_{cert}	155
5.11	Einfluss der HO-Maut auf die Systemkosten C_{sys}	156
5.12	Einfluss der HO-Maut auf die Systemkosten C_{sys}	157
5.13	Einfluss von FA_{ho} auf C_{sys} im HO-System	159
5.14	Veränderungen von FN_{ho} beim Markthochlauf	160
5.15	Einfluss von FA_{ho} und FN_{ho} auf die Systemkosten C_{sys} für un- terschiedliche CO_2 -Zertifikatspreise PC_{cert}	162
5.16	Einfluss von FA_{ho} und FN_{ho} auf CO_2 -Ausstoß	163
5.17	Einfluss von FN_{ho} auf C_{sys} im HO-System	164
5.18	CO_2 -Ausstoß bei Tramp- und Traktionsverkehr ohne eWay	164
5.19	C_{sys} bei Tramp- und Traktionsverkehr ohne eWay	165
5.20	CO_2 -Ausstoß bei Tramp- und Traktionsverkehr mit eWay	165
5.21	C_{sys} bei Tramp- und Traktionsverkehr mit eWay	166
5.22	Einfluss von FA_{trak} im Traktionsverkehr ohne eWay	166
5.23	Einfluss von FA_{trak} im Traktionsverkehr mit eWay	167
5.24	Einfluss von Faktor FA_{ho} im Traktionsverkehr auf eWays	168
5.25	Einfluss von Faktor FN_{ho} im Traktionsverkehr auf eWays	168

5.26	Effekt-Diagramm für CO ₂ -Ausstoß	169
5.27	Effektdiagramm für Systemkosten C_{sys} bei unterschiedlichen PC_{zert} .	170
5.28	Effektdiagramm für Systemkosten C_{sys} bei Änderung der Einstandspreise für Diesel, Strom und SZM	171
5.29	Änderung der Systemkosten durch Änderung der Mautsätze für HO-SZM auf dem eWay	175
5.30	Einfluss geänderter Kaufpreise für HO-SZM auf Systemkosten C_{sys} im Vergleich zum Dieselbetrieb	175
6.1	Fahrzeugzahlen in der Fallstudie für Stufe 1 und Stufe 2	178
6.2	eWay Ausbaustufe 1 und eWay Hubnetz groß	180
6.3	Mauttabelle der Straßenverkehrsgenossenschaft Frankfurt	181
6.4	Fahrzeugzahlen in der Fallstudie für Stufe 3	183
6.5	Traktionsverkehr zwischen Karlsruhe und Hamburg	188
6.6	Autobahnranstange Baden-Baden (Quelle: Google Earth)	189
6.7	Leerfahrten im Güterkraftverkehr	192
A.1	LKW-Preise	240
A.2	Kosten für Umschlagpunkte	241
A.3	Mauttabelle	245
A.4	Kostenentwicklung BGL	246
A.5	Gemeinkostenanteil laut SVG	247
A.6	Brennstoffzellen-LKW auf eWayBW angekündigt	248
A.7	SZM von IVECO mit Brennstoffzellenantrieb (03.11.2024 am eWayBW)	249
A.8	eTopas 600 von Steyer	250
A.9	Verteilung der Strecken für Postleitzahlgebiet 0	252
A.10	Verteilung der Strecken für Postleitzahlgebiet 1	253
A.11	Verteilung der Strecken für Postleitzahlgebiete 20-27	254
A.12	Verteilung der Strecken für Postleitzahlgebiete 28-35	255
A.13	Verteilung der Strecken für Postleitzahlgebiete 36-44	256
A.14	Verteilung der Strecken für Postleitzahlgebiete 45-53	257
A.15	Verteilung der Strecken für Postleitzahlgebiete 54-61	258
A.16	Verteilung der Strecken für Postleitzahlgebiete 63-70	259
A.17	Verteilung der Strecken für Postleitzahlgebiete 71-78	260
A.18	Verteilung der Strecken für Postleitzahlgebiete 79-86	261
A.19	Verteilung der Strecken für Postleitzahlgebiete 87-94	262

A.20	Verteilung der Strecken für Postleitzahlgebiete 95-99	263
------	---	-----

Tabellenverzeichnis

1.1	Kompensation bei der Stromerzeugung nach Wegfall der Kernenergie	17
2.1	Anteil des Transitverkehrs an der Gesamtleistung	53
2.2	Auszug aus Transportliste für PLZ-Gebiet 1	54
2.3	Abzug von Elektrokilometern an Autobahnkreuzen oder Anschlussstellen	56
2.4	Gefahrene Kilometer von PLZ nach PLZ-Gebiet	57
2.5	Anzahl Elektrokilometer von PLZ- nach PLZ-Gebieten	57
2.6	Anzahl Touren von PLZ- nach PLZ-Gebieten	59
2.7	Prozentsatz Anzahl Touren von PLZ- nach PLZ-Gebieten	59
2.8	eWay-Strecken in Einzelbetrachtung	61
2.9	Bevölkerung und Flächen für Postleitzahlgebiete	67
2.10	Rangfolge der E-Strecken ohne und mit Gewichtung	68
3.1	Marktanteile und Beförderungsweiten	72
3.2	Einsatzprofile im Fernverkehr nach Göckeler et al. (2020)	73
3.3	Einteilung der Fahrzeugklassen nach zGG	73
3.4	Anzahl SZM im Güterkraftverkehr	94
5.1	Absolute Werte für Systemkosten und CO ₂ -Ausstoß	144
5.2	SSA im Vergleich Trampverkehr zu Traktionsverkehr	151
5.3	Veränderungen von C_{sys} und SSA beim Markthochlauf	160
5.4	Elektro-Fahrtanteil bei unterschiedlicher Länge des eWay	173
5.5	Ergebnisvergleich für die beiden Hub-Netze	174
6.1	Einfluss System eWay auf das Hub-Tramp-Modell	185
6.2	Einfluss von eWay und Traktionsverkehr auf Hub-Traktionsmodell . .	186
6.3	Vergleich der Kilometerkosten	190
6.4	Vergleich der Umsatzrenditen	191
A.1	Literaturrecherche Teil 1 (komprimierte Darstellung)	243
A.2	Literaturrecherche Teil 2 (komprimierte Darstellung)	244

A.3	eWay Elektrokilometer in beiden Richtungen	264
-----	--	-----

Abkürzungen und Symbole

Abkürzungen

ABMG	Autobahnmautgesetz
AfD	Alternative für Deutschland
ArbZG	Arbeitszeitgesetz
B2C	Business to Customer
BAB	Bundesautobahn
BAG	Bundesamt für Güterverkehr (heute BALM)
BALM	Bundesamt für Logistik und Mobilität
BEHG	Brennstoffemissionshandelsgesetz
BFStrMG	Bundesfernstraßenmautgesetz
BGL	Bundesverband Güterkraftverkehr und Logistik
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
BMU	Bundes Ministerium für Umwelt, Naturschutz, Nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
BSW	Bündnis Sahra Wagenknecht
CDU	Christlich Demokratische Union
CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlendioxid
CO ₂ e	Kohlenstoffäquivalent
CSU	Christlich Soziale Union
DLR	Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt e.V.
dpa	Deutsche Presse Agentur

EE	Erneuerbare Energien
ELISA	Elektrifizierter Innovativer Schwerverkehr auf Autobahnen
ERS	Electric Road System
EU	Europäische Union
FCEV	Brennstoffzellenfahrzeug
FDP	Freie Demokratische Partei
FESH	Feldversuch eHighway Schleswig-Holstein
FTL	Full Truck Load (Komplettladung)
GFT	Güterfernverkehrstarif
GüKG	Güterkraftverkehrsgesetz
GVZ	Güterverteilzentrum
GW	Gigawatt
H ₂	Wasserstoff
H ₂ O	Wasser
HO-LKW	Hybrid-Oberleitungs-LKW
Hub	Nabe im Hub and Spoke Modell
HVO	Hydrotreated Vegetable Oil
KBA	Kraftfahrt Bundesamt
LKW	Lastkraftwagen
LNG	Liquified Natural Gas
MCS	Megawatt Charging System
OBU	On Board Unit
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PKW	Personenkraftwagen
PLZ	Postleitzahl
PPP	Public Private Partnership
PtX	Power to X
RFID	Radio-Frequency Identification

SoC	State of Charge
SoH	State of Health
SSA	Schadstoffausstoß
SVG	Straßenverkehrs Genossenschaft
SZM	Sattelzugmaschine
Tsd.	Tausend
TtW	Tank to Wheel, vom Tank zum Rad
TÜV	Technischer Überwachungsverein
TW	Terrawatt
TWh	Terrawattstunden
UBA	Umwelt Bundesamt
USA	United States, Vereinigte Staaten von Amerika
VR	Verkehrsrundschau
WtW	Well to Wheel, von der Quelle zum Rad
zGG	Zulässiges Gesamtgewicht
ZMS	Zeitfenster Management System

Symbole

Symbol	Einheit	Bedeutung
C	€	Kosten
CA	€	Anschaffungskosten
CA_{die}	€	Anschaffungskosten für Diesel-SZM
CA_{ho}	€	Anschaffungskosten für HO-SZM
CA_{bat}	€	Anschaffungskosten für Batterie-SZM
CA_{hvo}	€	Anschaffungskosten für HVO-Diesel-SZM
CA_{tr}	€	Anschaffungskosten für Trailer
CB	€	Betriebskosten
CB_{die}	€	Betriebskosten Diesel-SZM
CB_{ho}	€	Betriebskosten HO-SZM
CB_{bat}	€	Betriebskosten Batterie-SZM
CB_{hvo}	€	Betriebskosten HVO-Diesel-SZM
CB_{tr}	€	Betriebskosten Trailer
CC	€	CO ₂ -Kosten
CC_{ref}	€	CO ₂ -Kosten im Referenzmodell
CC_{die}	€	CO ₂ -Kosten der Diesel-SZM
CC_{ho}	€	CO ₂ -Kosten der HO-SZM
CF	€/Jahr	Flächenkosten
CF_{u1}	€/Jahr	Kosten Umschlagplatz 1
CF_{u2}	€/Jahr	Kosten Umschlagplatz 2
CG	€/Jahr	Gesamtkosten

CM	€/km	Mautkosten
CM_{die}	€/km	Kosten Maut Diesel-SZM
CM_{ho}	€/km	Kosten Maut HO-SZM
CM_{bat}	€/km	Kosten Maut Batterie-SZM
CM_{hvo}	€/km	Kosten Maut HVO-Diesel-SZM
CP	€/Jahr	Personalkosten
CP_{fern}	€/Jahr	Personalkosten Fahrer Fernverkehr
CP_{nah}	€/Jahr	Personalkosten Fahrer Nahverkehr
CP_{dis}	€/Jahr	Personalkosten Disponent
CP_{spe}	€/Tag	Spesensätze
$CP_{spefern}$	€/Tag	Spesensatz Fernfahrer
CP_{spenah}	€/Tag	Spesensatz Nahverkehrsfahrer
CR	€/Jahr	Reparaturkosten
CR_{die}	€/Jahr	Reparaturkosten für Diesel-SZM
CR_{ho}	€/Jahr	Reparaturkosten für HO-SZM
CR_{bat}	€/Jahr	Reparaturkosten für Batterie-SZM
CR_{hvo}	€/Jahr	Reparaturkosten für HVO-Diesel-SZM
CR_{tr}	€/Jahr	Reparaturkosten für Trailer
CR_{tras}	€/Jahr	Reparaturkosten für Trasse
CS	€/Jahr	Kosten Steuer
CS_{die}	€/Jahr	Kosten Steuer Diesel-SZM
CS_{ho}	€/Jahr	Kosten Steuer HO-SZM
CS_{bat}	€/Jahr	Kosten Steuer Batterie-SZM
CS_{hvo}	€/Jahr	Kosten Steuer HVO-Diesel-SZM
CS_{tr}	€/Jahr	Kosten Steuer Trailer-SZM

CT	€/Jahr	Kosten Treibstoff
CT_{die}	€/Jahr	Kosten Treibstoff Diesel-SZM
CT_{ho}	€/Jahr	Kosten Treibstoff HO-SZM
CT_{bat}	€/Jahr	Kosten Treibstoff Batterie-SZM
CT_{hvo}	€/Jahr	Kosten Treibstoff HVO-Diesel-SZM
CV	€/Jahr	Kosten Versicherung
CV_{kfz}	€/Jahr	Kosten Versicherung Fahrzeuge
CV_{die}	€/Jahr	Kosten Versicherung Diesel-SZM
CV_{ho}	€/Jahr	Kosten Versicherung HO-SZM
CV_{bat}	€/Jahr	Kosten Versicherung Batterie-SZM
CV_{hvo}	€/Jahr	Kosten Versicherung HVO-Diesel-SZM
CV_{tr}	€/Jahr	Kosten Versicherung Trailer
EF_{ftl}	€	Frachterlös Komplettlading (FTL)
EF_{pl}	€	Frachterlös Teillading (PL)

F	%	Faktor
FA_{ho}	%	Faktor Anteil HO-SZM
FC_{die}	t/l	Faktor CO ₂ e Diesel (WTW)
FC_{str}	t/kWh	Faktor CO ₂ e Strom (WTW)
FC_{hvo}	t/l	Faktor CO ₂ e HVO-Diesel
FC_{tras}	t/km	Faktor co ₂ e für Trasse
FN_{tras}	%	Faktor Anteil Nutzung Trasse
FP_{nodis}	%	Faktor Personal notwendige Disponenten
FR_{die}	%	Faktor Reparaturkosten Diesel-SZM
FR_{ho}	%	Faktor Reparaturkosten HO-SZM
FR_{homin}	%	Faktor Reparaturkosten Minderung HO-SZM
FR_{tr}	%	Faktor Reparaturkosten Trailer
FR_{tras}	%	Faktor Reparaturkosten Trasse
KF	%	Korrekturfaktor
KF_{rekup}	%	Korrekturfaktor Rekuperation
KF_{nula}	%	Korrekturfaktor Nutzlastverlust
KF_{repmi}	%	Korrekturfaktor Reparaturkostenminderung bei HO-SZM
KF_{mau}	%	Korrekturfaktor mautpflichtig
KF_{pl}	[1]	Korrekturfaktor Frachtsatz
KF_{zufa}	%	Korrekturfaktor Fahrer Zusatz
KF_{zufern}	%	Korrekturfaktor Fahrer Fernverkehrs-SZM Zusatz
KF_{zunah}	%	Korrekturfaktor Fahrer Nahverkehr-SZM Zusatz
KF_{zudis}	%	Korrekturfaktor Disponent Zusatz

P	€	Preise
PB	€	Baupreise
PB_{tras}	€/km	Baupreis HO-Trasse
PB_{up}	€/qm	Baupreis Umschlagplatz
PC	€	CO ₂ -Preise
PC_{zert}	€/t	CO ₂ -Zertifikat
PF_{hl}	€	Frachtsatz Hauptlauf
PF_{ftl}	€	Frachtsatz Komplettlading
PF_{pl5}	€	5-Tonnensatz
PF_{pl10}	€	10-Tonnensatz
PK	€	Kaufpreise
PK_{die}	€	Kaufpreis Diesel-SZM
PK_{ho}	€	Kaufpreis HO-SZM
PK_{bz}	€	Kaufpreis Brennstoffzellen-SZM
PK_{fern}	€	Kaufpreis Fernverkehrs-SZM
PK_{nah}	€	Kaufpreis Nahverkehrs-SZM
PK_{trak}	€	Kaufpreis Traktions-SZM
PK_{tramp}	€	Kaufpreis Trampverkehrs-SZM
PK_{tr}	€	Kaufpreis Trailer
PM	€/km	Mautsätze
PM_{die}	€/km	Mautsatz Diesel-SZM
PM_{ho}	€/km	Mautsatz HO-SZM
PM_{hoho}	€/km	Mautsatz HO-SZM im Stromantrieb
PM_{hodie}	€/km	Mautsatz HO-SZM im Dieselantrieb

PP	€	Jahresgehälter Personal
PP_{fern}	€	Jahresgehalt Fernfahrer
PP_{nah}	€	Jahresgehalt Nahverkehrsfahrer
PP_{dis}	€	Jahresgehalt Disponent
PP_{spefern}	€/Tag	Spesensatz Fernverkehr
PP_{spenah}	€/Tag	Spesensatz Nahverkehr
PS	€/Jahr	Steuersatz Fahrzeuge
PS_{die}	€/Jahr	Steuersatz Diesel-Fahrzeuge
PS_{ho}	€/Jahr	Steuersatz HO-Fahrzeuge
PS_{tr}	€/Jahr	Steuersatz Trailer
PT	€/Einheit	Treibstoffpreise
PT_{die}	€/l	Dieselpreis
PT_{str}	€/kWh	Strompreis
PT_{h2}	€/kg	Wasserstoffpreis
PV	€/Jahr	Versicherungsprämie Fahrzeuge
PV_{die}	€/Jahr	Versicherungsprämie Diesel-Fahrzeuge
PV_{ho}	€/Jahr	Versicherungsprämie HO-Fahrzeuge
PV_{tr}	€/Jahr	Versicherungsprämie Trailer
PW	€	Wiederverkaufspreise
PW_{die}	€	Wiederverkaufspreis Diesel-SZM
PW_{ho}	€	Wiederverkaufspreis HO-SZM
PW_{bz}	€	Wiederverkaufspreis Brfennstoffzellen-SZM
PW_{trak}	€	Wiederverkaufspreis Traktions-SZM

S	km	Strecke / Entfernung
S_{jll}	km	Jahreslaufleistung SZM
S_{auto}	km	Autobahnnetz Deutschland
S_{hl}	km	Hauptlauf-Strecke
S_{ho}	km	HO-Strecke
S_{trak}	km	Traktions-Strecke
S_{zu}	km	Zulauf-Strecke
S_{ab}	km	Ablauf-Strecke
S_{an}	km	Anfahrt-Strecke
S_{bela}	km	Strecke zwischen Beladestellen
S_{entla}	km	Strecke zwischen Entladestellen
S_{maupfl}	km	Strecke mautpflichtig
S_{u1}	km	Strecke zum Umschlagpunkt 1
S_{u2}	km	Strecke zum Umschlagpunkt 2
tn	Jahre	Nutzungsdauer
tn_{die}	Jahre	Nutzungsdauer Diesel-SZM
tn_{ho}	Jahre	Nutzungsdauer HO-SZM
tn_{trak}	Jahre	Nutzungsdauer Traktions-SZM
tn_{bat}	Jahre	Nutzungsdauer Batterie-SZM
tn_{bz}	Jahre	Nutzungsdauer Brennstoffzellen-SZM
tn_{tr}	Jahre	Nutzungsdauer Trailer
t_{arb}	h	Zeitdauer Summe Arbeitszeit ohne Lenken
t_{bereit}	h	Zeitdauer Bereitschaft
t_{bela}	h	Zeitdauer je Beladestelle
t_{entla}	h	Zeitdauer je Entladestelle

t_{lenk}	h	Lenkdauer
t_{lenkbela}	h	Lenkdauer Beladefahrten (Vorläufe)
$t_{\text{lenkentla}}$	h	Lenkdauer Entladefahrten (Nachläufe)
t_{lenkan}	h	Lenkdauer je Anfahrt zur ersten Beladestelle
t_{zulenk}	h	zulässige Tageslenkzeit
t_{zuarb}	h	zulässige Tagesarbeitszeit
v	km/h	Geschwindigkeit
v_{hl}	km/h	Geschwindigkeit Hauptlauf
v_{ho}	km/h	Geschwindigkeit HO-Strecke
v_{trak}	km/h	Geschwindigkeit Traktions-Strecke
v_{zu}	km/h	Geschwindigkeit Zulauf-Strecke
v_{ab}	km/h	Geschwindigkeit Ablauf-Strecke
v_{an}	km/h	Geschwindigkeit Anfahrt-Strecke
v_{bela}	km/h	Geschwindigkeit zwischen Beladestellen
v_{entla}	km/h	Geschwindigkeit zwischen Entladestellen
V		Verbrauch
V_{die}	l/km	spezifischer Verbrauch Diesel
V_{str}	kWh/km	spezifischer Verbrauch Strom
V_{h2}	kg/km	spezifischer Verbrauch Wasserstoff
VT_{die}	l	Verbrauch Diesel
VT_{str}	kWh	Verbrauch Strom

Z	Anzahl	Anzahl
ZF	Anzahl	Anzahl Fahrzeuge
ZF_{szm}	Anzahl	Anzahl SZM in Deutschland
ZF_{ref}	Anzahl	Anzahl Referenz-SZM
ZF_{die}	Anzahl	Anzahl Diesel-SZM
ZF_{ho}	Anzahl	Anzahl für HO-SZM
ZF_{nah}	Anzahl	Anzahl für Nahverkehrs-SZM
ZF_{fern}	Anzahl	Anzahl Fernverkehr-SZM
ZF_{tramp}	Anzahl	Anzahl Tramp-SZM
ZF_{trak}	Anzahl	Anzahl Traktions-SZM
ZF_{traktrak}	Anzahl	Anzahl Traktions-SZM auf Traktionsstrecke
ZF_{traknah}	Anzahl	Anzahl Nahverkehrs-SZM im Traktionsverkehr
ZF_{bat}	Anzahl	Anzahl Batterie-SZM
ZF_{tr}	Anzahl	Anzahl Trailer
ZL_{bela}	Anzahl	Anzahl Beladestellen
ZL_{entla}	Anzahl	Anzahl Entladestellen
ZP	Anzahl	Anzahl Personal
ZP_{fa}	Anzahl	Anzahl Fahrer
ZP_{fern}	Anzahl	Anzahl Fahrer Fernverkehr
ZP_{nah}	Anzahl	Anzahl Fahrer Nahverkehr
ZP_{trak}	Anzahl	Anzahl Fahrer Traktionsverkehr
ZP_{tramp}	Anzahl	Anzahl Fahrer Trampverkehr-Verkehr
ZP_{dis}	Anzahl	Anzahl Disponenten
ZP_{nodis}	Anzahl	Anzahl notwendiger Disponenten
ZP_{normdis}	Anzahl	Anzahl Disponenten im Grundbedarf

ZZ_{et}	Anzahl	Anzahl Einsatztage pro Jahr
ZZ_u	Anzahl	Anzahl Urlaubstage pro Jahr
ZZ_{ufa}	Anzahl	Anzahl Urlaubstage pro Jahr Fahrer
ZZ_{udis}	Anzahl	Anzahl Urlaubstage pro Jahr Disponenten
ZZ_{kra}	Anzahl	Anzahl Krankheitstage pro Jahr
ZZ_{krafa}	Anzahl	Anzahl Krankheitstage pro Jahr Fahrer
ZZ_{kradis}	Anzahl	Anzahl Krankheitstage pro Jahr Disponenten

Publikationsverzeichnis

Keine Publikationen

Literaturverzeichnis

- Abraham, Sven et al. (2017). *“Grenzen der Ladeinfrastruktur für Nutzfahrzeuge im innerstädtischen Betrieb unter Berücksichtigung erforderlicher spezifischer Aufwendungen zur Einrichtung der Ladeinfrastruktur: Projektarbeit”*. Diss. Hochschule Esslingen. (Abruf: 14. 07. 2025).
- Adolf, Jörg und Felix Balthasar (2010). *Shell LKW Studie: Fakten, Trends und Perspektiven im Straßengüterverkehr bis 2030*. URL: <http://www.shell.de/lkwstudie>. (Abruf: 14. 07. 2025).
- Adolf, Jörg, Christoph Balzer et al. (2016). *Shell Nutzfahrzeugstudie: Diesel oder alternative Antriebe - Womit fahren LKW und Bus morgen?* 14.07.2025. Shell Deutschland Oil GmbH. URL: <http://www.shell.de/>. (Abruf: 26. 07. 2024).
- Andersson, Matts und Patrick Plötz (2024). *Digital ERS Forum 1: Intro and presentations*. 26.07.2024. COLLERS2. URL: <http://electric-road-systems.eu>. (Abruf: 26. 07. 2024).
- Apfelstädt, Andy (2017). *Handlungsoptionen im euronationalen Ladungsverkehr*. 1. Auflage. Cuvillier Verlag Göttingen. ISBN: 978-3-7369-9563-5.
- Bachmann, Ruediger und Christian Bayer (2023). *Respekt vor unterschiedlichen Ausgangsbedingungen: Horizontale Fairness in die CO2-Bepreisung bringen*. Bonn. URL: <https://www.econtribute.de/> (Abruf: 15. 07. 2025).
- Beckers, Thorsten et al. (2019). *Zentrale Ausgestaltungsfragen hinsichtlich eines Förderregimes für Oberleitungs-Hybrid-LKW (OH-Lkw) – Eine (institutionen-)ökonomische Analyse*. URL: <https://www.ifeu.de/>. (Abruf: 18. 02. 2021).

- Bernecker, Tobias et al. (2020). “*Business Models, Ownership, and Financing Strategies*”. Final report. Hochschule Heilbronn. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1469344/FULLTEXT02> (Abruf: 25. 05. 2024).
- Beutler, Felix et al. (2021). *Transformation der Automobilindustrie: Was jetzt zu tun ist*. Böll Brief. Berlin. URL: www.boell.de/ (Abruf: 11. 01. 2025).
- BFStrMG (2011). *Bundesfernstraßenmautgesetz: BFStrMG*.
- BGL Bundesverband Güterverkehr Logistik und Entsorgung eV. (2017). *Jahresbericht 2017*. URL: www.bgl.ev-de (Abruf: 08. 12. 2021).
- Bioly, Sascha und Matthias Klumpp (2014). *Statusanalyse der Rahmenbedingungen für Fahrberufe in Logistik und Verkehr*. Bd. 39. Arbeitspapiere der FOM. Schriftenreihe Logistikforschung ISSN 1866-0304. Essen: ILD.
- BMVI (2020). *Verkehr in Zahlen 2020/2021*. Kraftfahrt-Bundesamt.
- Bothe, David (2018). “*Indirekte Elektrifizierung für eine erfolgreiche Verkehrswende*”. In: *ATZ-Automobiltechnische Zeitschrift* 120.10, S. 20–25.
- Bühs, Florian (2023). *Digitalisierung im Eisenbahnwesen: Systementwicklung am Beispiel Dynamic Charging eHighway*. URL: https://www.researchgate.net/publication/370778991_Digitalisierung_im_Eisenbahnwesen_-_Systementwicklung_am_Beiispiel_Dynamic_Charging_eHighway (Abruf: 23. 10. 2023).
- Bundesministerium der Justiz (2019). *BEHG Gesetz über einen nationalen Zertifikatehandel für Brennstoffemissionen (Brennstoffemissionshandelsgesetz - BEHG)*. (Abruf: 02. 09. 2024).
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2021). *Richtlinie zur Förderung privater Investoren zur Schaffung von zusätzlichen Lkw-Stellplätzen in der Nähe von Autobahnanschlussstellen*. URL: www.bundesanzeiger.de (Abruf: 16. 02. 2024).
- Bundesregierung (2021). *Koalitionsvertrag 2021-2025 Mehr Fortschritt wagen*. URL: <https://www.bundesregierung.de/> (Abruf: 30. 12. 2021).

- Burghard, Uta und Aline Scherrer (2020). *Der eHighway aus gesellschaftlicher Perspektive: Erkenntnisse zur sozialen Akzeptanz und den Akteuren rund um Oberleitungs-Lkw-Systeme in Deutschland und Europa*. Version 1. BOLD - Begleitforschung Oberleitungs-Lkw in Deutschland. Fraunhofer ISI Karlsruhe.
- Clausen, Uwe (2015). *Die Zukunft der Logistik - Herausforderung und Chancen*. Vortrag vor dem Verkehrsausschuss des Bundesverband der deutschen Industrie am 28.10.2015 in Berlin. Fraunhofer IML. (Abruf: 18. 05. 2024).
- Dabidian, Hooman und Andrew Stone (2012). *Private Sector Development in Iraq: An Investment Climate Reform Agenda*. Bd. no. 74. MENA knowledge and learning quick notes series. World Bank, Washington, DC. URL: <http://hdl.handle.net/10986/20577> (Abruf: 18. 07. 2025).
- Dörken, Veit Martin (2013). *Litchi chinensis und Nephelium lappaceum: Litschi und Rambutan, zwei Seifenbaumgewächse mit ungewöhnlichen Früchten*. Jahrbuch Bochumer Botanischer Verein 4, 210-2013. DOI: 366578.
- Elbert, Ralf et al. (2014). *Marktpotential von Fahrzeugen mit Hybrid-Antrieb bei Logistikdienstleistern: Auszug aus dem Forschungsbericht des Fachgebiets Unternehmensführung und Logistik*. Bd. Nr. 3. Technische Universität Darmstadt.
- Fasthuber, Dominik (2020). *Integration der Ladeinfrastruktur in das elektrische Energiesystem*. Bd. 137 4-5. Elektrotechnik & Informationstechnik (2020), S. 156–160.
- Geskes, Peter et al. (2020). *48-V-Mildhybridsystem für Lastkraftwagen*. ATZ 122. Jahrgang Heft 09/2020, S. 38–42.
- Gnann, Till (2017). *Technologiebericht B.1b Elektromobilität Hybrid-Oberleitungs-LKW innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energiewende*. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Karlsruhe. URL: <https://public-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/1c383705-76ae-45a4-aa1b-393c23bd5aa6/content> (Abruf: 18. 02. 2021).
- (2018). *Technologiebericht 7.2 Elektromobilität - Hybrid-Oberleitungs-LKW (energiewirtschaftliche Aspekte) innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energiewende*.

URL: https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7070/file/7070_Elektromobilitaet_LKW.pdf (Abruf: 18.02.2021).

Gnann, Till, Uta Burghard et al. (2021). *BOLD Begleitforschung Oberleitungs-Lkw in Deutschland: Präsentation Stakeholder-Dialog: 1. Workshop am 26.11.2020*. URL: https://www.oeko.de/fileadmin/user_upload/BOLD_Stakeholder-Dialog_Programm.pdf (Abruf: 18.02.2021).

Gnann, Till, Martin Wietschel, André Kühn et al. (2017). *Teilstudie Brennstoffzellen-Lkw: kritische Entwicklungshemmnisse, Forschungsbedarf und Marktpotential: Wissenschaftliche Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie*. Karlsruhe: Fraunhofer ISI and Fraunhofer IML. URL: <https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/cd8f14d0-2b3b-4209-a2ce-c2005a4ae976/content> (Abruf: 22.04.2021).

Gnann, Till, Martin Wietschel, Patrick Plötz et al. (2017). *Potenziale und Finanzierungsbedarf von Hybrid-Oberleitungs-LKW*. Vortrag bei der 4. Konferenz Verkehrsökonomik und -politik am 29. und 30. Juni 2017. Berlin. URL: <https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/cd8f14d0-2b3b-4209-a2ce-c2005a4ae976/content> (Abruf: 22.04.2022).

Göckeler, Katharina, Frank Haase et al. (2022). *Anforderungen der Logistikbranche an einen Umstieg auf klimaschonende Fahrzeugtechnologien: Ergebnisbericht einer standardisierten Befragung*. Öko Institut e.V. Berlin am 24.02.2022. URL: https://www.researchgate.net/profile/Jonas-Heinzelmann/publication/361603910_Anforderungen_der_Logistikbranche_an_einen_Umstieg_auf_klimaschonende_Fahrzeugtechnologien/links/62bc00ecf9dee438e8cae9bc/Anforderungen-der-Logistikbranche-an-einen-Umstieg-auf-klimaschonende-Fahrzeugtechnologien.pdf (Abruf: 19.07.2025).

Göckeler, Katharina, Florian Hacker et al. (2020). *Status quo und Perspektiven alternativer Antriebstechnologien für den schweren Straßengüterverkehr: Erster Teilbericht*. Öko Institut e.V. Berlin am 15.10.2020. URL: <https://cdn0.scrvt.com/5b9bbd140a15e188780a6244ebe572d4/0361cfdcab9a4081/ff82afcd833a/StratES-Teilbericht1-Marktanalyse-2-.pdf> (Abruf: 19.07.2024).

- Göhlich, Dietmar und Andreas F. Raab (2021). *Mobility2Grid – Sektorenübergreifende Energie- und Verkehrswende*. Springer Vieweg. ISBN: 978-3-662-62628-3. (Abruf: 29. 12. 2021).
- Hacker, Florian, Ruth Blanck et al. (2020). *StratON: Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge: Endbericht: Endbericht*. Öko Institut e.V. Berlin im Februar 2020. URL: <https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/744d93f4-5cef-484f-9864-839e7a179d4f/content> (Abruf: 19. 07. 2025).
- Hacker, Florian, Julius Jöhrens et al. (2020). *BOLD Begleitforschung Oberleitungs-LKW in Deutschland: Wirtschaftlichkeit, Umweltwirkung und Ausbauszenarien von Oberleitungs-Lkw in Deutschland: Eine Synthese*. Ökoinstitut e.V. im April 2020. URL: https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/Stand_desWissens_OH-Lkw_Zusammenfassung_final_2020-05-25.pdf (Abruf: 19. 07. 2025).
- Hacker et al. (2023). *Expansion Strategies for Electric Road Systems (ERS) in Europe: A working paper from the COLLERS2 project*. URL: https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/Publikationen/Mobilit%C3%A4t/COLLERS-2-Discussion-paper-4-Expansion-strategies_2023-08-04.pdf (Abruf: 19. 07. 2025).
- Hagen, Markus et al. (2022). *Ansatz einer wirtschaftlichen Bewertung von Batterien im Zusammenhang mit Oberleitungs-LKW auf Basis spezifischer Fahrprofile*. Bd. 01/2022. eWayBW II Working Paper. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. DOI: 10.24406/publica-463. (Abruf: 19. 07. 2025).
- Hartwig, Karl-Hans und Torsten Marner (2005). *Maut für alle? Straßenbenutzungsgebühren auch für PKW*. Wirtschaftsdienst 2005/2, S. 102–108. URL: <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/42413/1/47997246X.pdf> (Abruf: 19. 07. 2025).
- Helmers, Eckard und Patrick Marx (2012). *Electric cars: technical characteristics and environmental impacts*. Environmental Sciences Europe 2012. Springer Open Journal. URL: <http://www.enveurope.com/content/24/1/14> (Abruf: 15. 03. 2025).

- Höhne, Niklas et al. (2020). *Zwei neue Klimaschutzziele für Deutschland: Kurzstudie*. URL: https://newclimate.org/sites/default/files/2020/05/Zwei_neue_Klimaschutzziele_f%C3%BCr_Deutschland_5_2020.pdf (Abruf: 19.07.2025).
- ifo Institut (2024). *ifo Geschäftsklimaindex: September 2024*. URL: <https://www.ifo.de/fakten/2024-09-24/ifo-geschaeftsklimaindex-gesunken-september-2024> (Abruf: 30.09.2024).
- Jodlbauer, Herbert (2020). *Geschäftsmodelle erarbeiten: Modell zur digitalen Transformation etablierter Unternehmen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien. ISBN: 978-3-658-30455-3.
- Jöhrens, Julius (2017). *Roadmap-OH-Lkw_SWOT-Analyse_aktualisiert*. ifeu Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg. URL: https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/201712_ifeu_M-Five_Roadmap-OH-Lkw_SWOT-Analyse_aktualisiert.pdf (Abruf: 05.11.2021).
- Jöhrens, Julius et al. (2020). *Roadmap OH-Lkw: Einführungsszenarien 2020-2030: Optimierung des Infrastrukturaufbaus für O-Lkw und Analyse von Kosten- und Umwelteffekten in der Einführungsphase. Untersuchung im Rahmen des Verbundvorhabens „Roadmap OH-Lkw“*. URL: https://www.ifeu.de/publikationen?tx_solr%5Bfilter%5D%5B0%5D=person%3A3886&tx_solr%5Bfilter%5D%5B1%5D=dateStart%3A2020 (Abruf: 17.05.2021).
- Knieps, Günter, Hrsg. (2006a). *Die LKW-Maut als erster Schritt in eine neue Verkehrsinfrastrukturpolitik: 38. Verkehrswissenschaftliches Seminar ; am 29. und 30. September 2005 in Freiburg im Breisgau*. Bd. 292. Schriftenreihe der Deutschen Verkehrswissenschaftlichen Gesellschaft Reihe B, Seminar. Berlin: Dt. Verkehrswiss. Ges. ISBN: 978-3-937877-13-6.
- (2006b). *Die LKW-Maut und die drei Grundprobleme der Verkehrsinfrastrukturpolitik*. DOI: 10.6094/UNIFR/14364. URL: <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/32327/1/511535309.pdf> (Abruf: 19.07.2025).

- Kombiverkehr Deutsche Gesellschaft für kombinierten Güterverkehr mbH & Co. Kommanditgesellschaft. (2024). *Satzung*. URL: https://www.kombiverkehr.de/_Resources/Persistent/4/1/5/9/4159695381c4a5b3272723fd98a27175c52ebb02/Satzung%20Kombiverkehr%20KG_062024.pdf (Abruf: 16. 07. 2024).
- Kopfer, Herbert, Heiko Wieland Kopfer et al. (2008). *Strategien für die Auftragsdisposition in Speditionsunternehmen*. URL: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/98810516/SFB637-B9-08-005-IA-libre.pdf?1676704167=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DStrategien_fur_die_Auftragsdisposition_i.pdf&Expires=1752937158&Signature=JIMf0xZWfDu76PZxmoUV2BkZ3B8kLEhPgYL0RSNNL0fWpQP6XiTi6NHJnquFIXZ7KAyz494gEu4BZzu2-ZlRpBpqSpWc4f9iPfgjp1XRPU1MwoDRBSv6OK2MWvmoShnIk1CQKkhxSnaQZj7aogXEG-uX2qmG6PhPPpIr4Br5Dtox1YGhQuTwlkHtCO4EEIOV31KU3JFZHPBWbrNPAiCNt9Oug3Zo8TmpGnvddgICNu5lIiIPDK8h-fpHj~THUrsDrXHPr-hRNMfNh3ruZ3k5dDscGbQ7oHOepr04GM4U2-56jCG3By43xyEkvWn6eHYr4aD0lo-ROCTIRU3JaGIw__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA (Abruf: 23. 11. 2023).
- Kopfer, Herbert und Giselher Pankratz (1999). *Das Groupage-Problem kooperierender Verkehrsträger*. URL: https://www.researchgate.net/profile/Herbert-Kopfer-2/publication/37922037_Das_Groupage-Problem_kooperierender_Verkehrstraeger/links/569bacbe08aecea985a5749e/Das-Groupage-Problem_kooperierender-Verkehrstraeger.pdf (Abruf: 02. 05. 2023).
- Krap, Niels (2005). *Die (un)-endliche Geschichte der LKW-Maut: Eine vertragstheoretische Analyse*. URL: <http://hdl.handle.net/10419/143429> (Abruf: 02. 05. 2023).
- Kruse, Mirko und Jan Wedemeier (2021). *Potenzial grüner Wasserstoff: langer Weg der Entwicklung, kurze Zeit bis zur Umsetzung*. Bd. 101. Wirtschaftsdienst 2021. DOI: 10.1007/s10273-021-2821-9. (Abruf: 28. 12. 2023).

- Kühnel, Sven et al. (2018). *Oberleitungs-Lkw im Kontext weiterer Antriebs- und Energieversorgungsoptionen für den Straßengüterfernverkehr: Ein Technologie- und Wirtschaftlichkeitsvergleich*. URL: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratON-O-Lkw-Technologievergleich-2018.pdf> (Abruf: 18. 02. 2021).
- Kummer et al. (2011). *Auswirkungen der Einbeziehung externer Kosten in die LKW-Maut, insbesondere hinsichtlich einer zeitlichen Differenzierung: Endbericht*. Wien. URL: https://research.wu.ac.at/ws/portalfiles/portal/19848056/eb_wegekostenrl_externekosten_final.pdf (Abruf: 29. 12. 2023).
- Kunze, Oliver et al. (2012). *Dynamic Truck Meeting (DTM) : ein Prozess- & Schnittstellenstandard zur Realisierung von dynamischen Begegnungsverkehren mit Hilfe von Dispositions- und Telematik-Systemen. Band 1 (Prozess-Standard) u. KIT Scientific Publishing*. ISBN: 978-3-86644-850-6.
- Lahl, Uwe (2020). *Nutzen wir die Chancen der Elektromobilität*. Bd. 122. ATZ, S. 66–69. (Abruf: 29. 11. 2021).
- Lechtenböhrer, Stefan et al. (2019). *Grüner Wasserstoff, das dritte Standbein der Energiewende?* Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. URL: https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7409/file/7409_Lechtenboehmer.pdf (Abruf: 28. 12. 2023).
- Liedtke, Gernot (2020). *Realistische Dekarbonisierungsoptionen für den Güterverkehr: Vortrag von Prof. Dr. Gernot Liedtke im Rahmen des Seminars des Fachgebiets Verkehrssystemplanung und Verkehrstelematik Institut für Land- und Seeverkehr Technische Universität Berlin 03.06.2020*. URL: <https://elib.dlr.de/139695/> (Abruf: 30. 04. 2024).
- Lohre, Dirk et al. (2015). *Nachhaltigkeitsmanagement für Logistikdienstleister: Ein Praxisleitfaden*. Wiesbaden Germany: Springer Gabler. ISBN: 978-3-658-03124-4.
- Markwardt, Günther und Marcus Dittrich (2003). *Zu kurz gedacht? Die LKW-Maut - ein (ungenutztes) Lenkungsinstrument auf dem Prüfstand*. Dresden.

URL: <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/169704/1/ifo-db-v10-y2003-i06-p43-50.pdf> (Abruf: 07. 07. 2025).

Marx, August, Hrsg. (1967). *Autohöfe des Güterkraftverkehrs*. Wiesbaden: Gabler. ISBN: 978-3-663-00417-2.

Motta, Marco et al. (2004). *Simulation eines Regionallagerkonzeptes*. Bd. 03032. Technical report / Sonderforschungsbereich 559 Modellierung Großer Netze in der Logistik. ISSN 1612-1376. Dortmund: Universitätsbibliothek Dortmund. DOI: 5510.

Müller, Stefanie und Peter Klaus (2009). *Die Zukunft des Ladungsverkehrs in Europa: Ein Markt an der Schwelle zur Industrialisierung?* 1. Aufl., Stand: Februar 2009. DVZ Praxis. Hamburg: DVV Media Group Dt. Verkehrs-Verl. ISBN: 978-3-87154-397-5.

Neubäumer, Renate (2019). *Der Klimawandel wird weitergehen - eine unbequeme Wahrheit*. Wirtschaftsdienst 2019 / 11, S. 798–807. URL: <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/213261/1/798-807-Neubaeumer.pdf> (Abruf: 20. 07. 2025).

Pfennig, Maximilian et al. (2021). *Weltweite Potenziale für die Erzeugung von Grünem Wasserstoff und klimaneutralen Synthetischen Kraft- und Brennstoffen: Teilbericht im Rahmen des Projektes: DeV-KopSys*. URL: <https://www.iee.fraunhofer.de/de/presse-infothek/Presse-Medien/Pressemitteilungen/2021/neuer-atlas-power-to-x-potenziale.html> (Abruf: 28. 12. 2023).

Plötz, Patrick, Till Gnann et al. (2018). *Alternative Antriebe und Kraftstoffe im Straßengüterverkehr-Handlungsempfehlungen für Deutschland E-Way*. URL: <https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/bcc66a8c-3448-4247-9730-aff717340aa4/content> (Abruf: 17. 05. 2021).

Plötz, Patrick und Anne-Catherine Jung (2024). *E-Lkw: Was gilt es beim flächendeckenden Aufbau von Schnelllade-Standorten zu beachten?* URL: <https://www.isi.fraunhofer.de/de/presse/2024/presseinfo-09-e-lkw-schnelllade-standorte.html> (Abruf: 15. 10. 2024).

- Prokop, Günther und André Stoller (2012). *Der Güterverkehr von morgen: LKWs zwischen Transporteffizienz und Sicherheit*. Bd. 30. Schriftenreihe Ökologie. ISBN: 978-3-86928-103-2. URL: https://www.boell.de/sites/default/files/Gueterverkehr_von_Morgen.pdf (Abruf: 08. 12. 2021).
- Schlott, Stefan (2020). *Entwicklungspfade zum CO₂-neutralen Güterverkehr*. Bd. 122. ATZ, S. 8–13. (Abruf: 15. 05. 2023).
- Schmidpeter, René, Hrsg. (2012). *CSR und Klimawandel: Unternehmenspotenziale und Chancen einer nachhaltigen und klimaschonenden Wirtschaftstransformation*. Springer Gabler. ISBN: 978-3-662-59747-7. (Abruf: 29. 12. 2021).
- Siebertz, Karl et al. (2017). *Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments (DoE)*. 2. Auflage 2017. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-662-55743-3. DOI: 10.1007/978-3-662-55743-3.
- Siemens (2012). *ENUBA Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen: Schlussbericht vom 31.08.2012*. Version vom 31.08.2012. Erlangen. DOI: 10.2314/GBV:771116896. URL: <https://edocs.tib.eu/files/e01fb13/771116896.pdf>.
- (2016a). *ENUBA 2: Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen: Gemeinsamer Abschlussbericht vom 31.08.2016*. URL: https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2016-09/ENUBA2_Abschlussbericht_V3_TIB_31-08-2016.pdf (Abruf: 18. 02. 2021).
 - (2016b). *World's first eHighway opens in Sweden*. URL: <https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/worlds-first-ehighway-opens-sweden> (Abruf: 07. 02. 2025).
 - (2020). *eHighway - Lösungen für den elektrifizierten Straßengüterverkehr*. URL: <https://press.siemens.com/global/de/feature/ehighway-loesungen-fuer-den-elektrifizierten-strassengueterverkehr> (Abruf: 22. 02. 2021).
- Thomann et al. (2022). *Hintergrundpapier zu nachhaltigem grünen Wasserstoff und Syntheseprodukten*. Bd. 2022, 01. HYPAT working paper. Karlsruhe: Fraunhofer ISI. URL: <https://www.hypat.de/hypat-wAssets/docs/new/>

publikationen/HyPAT_Working-Paper_01-2022_Hintergrundpapier_nachhaltiger_gruener_Wasserstoff_Syntheseprodukten.pdf (Abruf: 28. 12. 2023).

Umweltbundesamt (2024). *Trends der Lufttemperatur*. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/trends-der-lufttemperatur#steigende-durchschnittstemperaturen-weltweit> (Abruf: 23. 09. 2024).

Wietschel, Martin, Uta Burghard et al. (2020). *Schnittstellen zum angrenzenden Ausland – Analyse der Chancen und Herausforderungen von Oberleitungs-Lkw für den Gütertransport in angrenzenden Regionen von Baden- Württemberg*. URL: <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/216204/1/1696045789.pdf> (Abruf: 02. 11. 2021).

Wietschel, Martin, Till Gnann et al. (2017). *Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw. Studie im Rahmen der Wissenschaftlichen Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie*. URL: <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/4e8883cf-5dab-4a8c-93bed22cf04d212f> (Abruf: 12. 10. 2024).

Zanker, Claus (2018). *Branchenanalyse Logistik: Der Logistiksektor zwischen Globalisierung, Industrie 4.0 und Online-Handel*. Bd. 390. Study der Hans-Böckler-Stiftung. Düsseldorf: Hans-Böckler-Stiftung. ISBN: 978-3-86593-302-7.