



CO₂-Reduktion im Strassengüterverkehr

Aktuelle und zukünftige Massnahmen aus der Sicht von
Flottenbetreibern und Verladern

Autoren

Julian Hess
Wolfgang Stölzle





CO₂-Reduktion im Strassengüterverkehr

Aktuelle und zukünftige Massnahmen aus der Sicht von Flottenbetreibern und Verladern





CO₂-Reduktion im Strassengüterverkehr

Aktuelle und zukünftige Massnahmen aus der Sicht von
Flottenbetreibern und Verladern

Autoren

Julian Hess

Wolfgang Stölzle



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2021

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2021

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2021

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-7369-7464-7

eISBN 978-3-7369-6464-8



Geleitwort der Fördervereinigung des Instituts für Supply Chain Management der Universität St.Gallen

Angaben zur Fördervereinigung

Fördervereinigung ISCM-HSG c/o Institut für Supply Chain Management (ISCM-HSG)

Dufourstrasse 40a, CH-9000 St. Gallen

Geleitwort

Wie es den Zielsetzungen der Fördervereinigung entspricht, hat sich dieser auch im Jahre 2020 an einer Studie des Instituts beteiligt, diesmal zum CO₂-Verbrauch im Straßengüterverkehr. Die Studie gilt erneut als ein Beispiel für das erfolgreiche Zusammenwirken des Instituts mit Vereinsmitgliedern aus der Verladerschaft und der Logistikdienstleistung, ergänzt um Konsortialpartner, die bis dato noch keine Vereinsmitglieder waren.

Die Zielsetzung der Studie ist eine Versachlichung der Diskussion um geeignete Massnahmen zur CO₂-Reduktion im Strassengüterverkehr, frei von den vielfach vertretenen politischen Wertungen. Die Marktteilnehmer sollen Fakten an die Hand bekommen, um sich für die Zukunft ausrichten zu können. Einen grossen Schwerpunkt der Studie bilden Antriebsformen mit ihren für die Praxis relevanten Merkmalen.

Untersucht werden insofern alle Kraftstoffvarianten von Diesel über Biodiesel, komprimiertes Gas, flüssiges Erdgas und Biogas ebenso wie elektrische Varianten von batteriebetriebenen Fahrzeugen bis hin zur Oberleitung und Brennstoffzelle. Dabei wurden auch Sondereffekte wie der verfügbare „Grüne Strom“ in der Schweiz durch Wasserkraft oder auch die jeweiligen Gebühren wie Maut bzw. Verkehrsabgaben berücksichtigt.

Das Ergebnis entspricht dem, was der Verein forcieren möchte, nämlich die Auswertung einer praktisch relevanten Frage auf einer akademischen Grundlage, ausgerichtet auf die Belange der Praxis, auch unter Mitwirkung der Praxis und auf diese zugeschnitten.

Im Namen des Vereins bedanke ich mich deshalb herzlich bei den Mitarbeitenden des Instituts einerseits, vorrangig den Herren Prof. Stölzle und Hess, andererseits auch den Mitgliedern des Vereins und den weiteren Mitwirkenden der Studie, die dazu beigetragen



haben, eine solche Übersicht über die derzeit verfügbaren Massnahmen und ihre Nützlichkeit zu erstellen.

Dr. Marcus Schriefers (Mitglied des Vorstands)



Geleitwort Berger Logistik GmbH

Angaben zum Unternehmen

Berger Logistik GmbH

Bahnhofplatz 1

6300 Wörgl (Österreich)

Markus Ley

Geschäftsführer

Geleitwort

Für ein mittelständisches Logistikunternehmen wird es immer wichtiger, sich entsprechend den wichtigen Kundenanforderungen, aber auch den eigenen sehr ambitionierten Klimazielen in der Logistik zu stellen und diese zu erreichen.

Für Berger Logistik sind Qualität und Nachhaltigkeit strategische Eckpfeiler in der Logistikbranche geworden und besonders die Nachhaltigkeit ist nur durch die Covid-19 Pandemie etwas in den Hintergrund gerückt.

Ein wichtiger Baustein dazu ist der Straßengüterverkehr und damit neue Technologien, alternative Antriebe und die dazu benötigte Infrastruktur, aber auch Einflüsse wie Digitalisierung, die den weiteren Trend bestimmen werden.

Mit der vorliegenden Studie möchte die Berger Logistik die Gelegenheit nutzen, mit einem renommierten Institut für Supply Chain Management der Universität St. Gallen aktuelle wissenschaftliche Erkenntnisse darüber zu erhalten, mit dieser Studie einen Gesamtüberblick über die CO₂-Einsparungspotentiale und die Total Cost of Ownership für alle Antriebsarten sowie Detailanalysen zu den Erkenntnissen einzelner Technologien zu bekommen.

Berger Logistik GmbH



Geleitwort Robert Bosch GmbH

Angaben zum Unternehmen

Robert Bosch GmbH

Robert-Bosch-Platz 1

70839 Gerlingen-Schillerhöhe (Deutschland)

Holger Langbein

Vice President Logistics

Geleitwort

Für die Bosch Gruppe ist Nachhaltigkeit in allen Unternehmensbereichen bereits seit langem ein zentrales Thema. Bereits in den siebziger Jahren war unser Leitmotto: Sicher, Sauber, Sparsam. Wir sind sehr stolz darauf, im Jahre 2020 als großes weltweit agierendes Unternehmen CO₂-Neutralität erreicht zu haben und werden den Weg der CO₂-Reduktion in der Supply Chain mit unseren Lieferanten und Logistikdienstleistern genauso konsequent beschreiten.

Unser Dank für diese sehr gelungene Studie zur CO₂-Reduktion im Straßengüterverkehr geht an die Herren Prof. Dr. Wolfgang Stölzle, Julian Hess und alle weiteren beteiligten Mitarbeitenden. Die Studie gibt uns wichtige Orientierungspunkte für die weitere Gestaltung der Lieferketten, um auch hier im Sinne des Scope 3 die notwendige Reduktion der Emissionen zu erreichen. Insbesondere die unterschiedliche Betrachtung der Voraussetzungen im untersuchten DACH Raum eröffnen länderspezifische Handlungsalternativen.

Der technologieoffene Vergleich von alternativen Antriebskonzepten wie Gas, Wasserstoff oder Batterie jeweils im Vergleich mit und ohne Förderungen wie Mautbefreiung bildet eine gute Basis für zukünftige Betrachtung unter Berücksichtigung der jeweiligen Gesetzgebungen der Länder. Es gibt daher auch keinen eindeutigen „Königsweg“ der Antriebstechnologie, sondern es wird über die nächsten Jahre einen Mix unterschiedlicher Technologien in Abhängigkeit der Streckenlängen und Transportlasten geben. Dies stellt die Zulieferindustrie und die Hersteller von Lkw vor große Herausforderungen und daher ist umso wichtiger, dass die Politik klare und längerfristig wirkende Fördermaßnahmen und Vorgaben definiert.



CO₂-reduzierende Technologien im Straßengüterverkehr werden in größerem Maßstab ab Mitte dieses Jahrzehnts verfügbar sein. In Kombination mit politisch und gesellschaftlich gesetzten Anreizen bin ich sehr zuversichtlich, dass wir bis zum Ende dieses Jahrzehnts bereits große Fortschritte in der Emissionsreduktion sehen werden. Verlader und Transportdienstleister sollten hier eng zusammenarbeiten, um optimale CO₂-reduzierende Transportkonzepte zu erstellen, die den regionalen und infrastrukturellen Gegebenheiten entsprechen.

Über Bosch

Die Bosch-Gruppe ist ein international führendes Technologie- und Dienstleistungs-Unternehmen mit weltweit rund 400 000 Mitarbeitern (Stand: 31.12.2019). Sie erwirtschaftete im Geschäftsjahr 2019 einen Umsatz von 77,7 Milliarden Euro. Die Aktivitäten gliedern sich in die vier Unternehmensbereiche Mobility Solutions, Industrial Technology, Consumer Goods sowie Energy and Building Technology. Bosch bietet „Technik fürs Leben“. Die Bosch-Gruppe umfasst die Robert Bosch GmbH sowie ihre rund 440 Tochter- und Regionalgesellschaften in 60 Ländern. Bosch beschäftigt weltweit rund 72 600 Mitarbeiter in Forschung und Entwicklung an 126 Standorten. Im Unternehmen sind etwa 30 000 Software-Entwickler tätig.

Das Unternehmen wurde 1886 als „Werkstätte für Feinmechanik und Elektrotechnik“ von Robert Bosch (1861–1942) in Stuttgart gegründet.

www.bosch.com



Geleitwort BTK Befrachtungs- und Transportkontor GmbH

Angaben zum Unternehmen

BTK Befrachtungs- und Transportkontor GmbH

Dr.-Steinbeißer-Straße 2

83026 Rosenheim (Deutschland)

Josef Heiß

Geschäftsführer

Geleitwort

Rund um Gebäude, Ausstattung und vor allem bei der eigenen Flotte setzen wir als Transport- und Logistikdienstleister auf nachhaltige Technologien. Leider sehen wir derzeit keinen alternativen Antrieb am Markt, der den Dieselmotor auf allen Strecken komplett ablösen kann. Alle verfügbaren und marktreifen Technologien schaffen den Spagat zwischen Wirtschaftlichkeit und CO₂-Ausstoß noch nicht ohne staatliche Förderung.

Als klimabewusstes Unternehmen müssen wir CO₂ einsparen und langfristig mit dem richtigen Technologie-Mix wettbewerbsfähig bleiben. Für dieses Ziel investieren wir permanent und strategisch in neue Technologien, auch wenn sie noch keinen Quantensprung bringen. Ein gutes Beispiel für diese Strategie ist der Einsatz von Flüssiggas. Obwohl wir den Antrieb von Anfang an als Brückentechnologie bewertet haben, waren wir 2018 in Deutschland unter den Vorreitern. Heute betreiben wir damit rund 10 Prozent der eigenen Flotte und haben viel Erfahrung im Spagat zwischen Rentabilität und Umweltschutz gesammelt.

Im Rahmen der Studien an der Universität St. Gallen suchen wir immer wieder den Austausch mit anderen Unternehmen. So können wir mit unserer Praxiserfahrung die Forschungsarbeit unterstützen, die uns langfristig mit neuen Technologien den Quantensprung ermöglichen wird. Außerdem gewinnen wir in der Diskussion mit den Konsortialpartnern neue Perspektiven und Erkenntnisse für unsere eigene Rolle in der Logistikkette vom Verloader bis zum Empfänger. Die Studienergebnisse dienen dabei als überzeugende Grundlage, auf der wir kurz- und mittelfristig sehr wirksam an den Stellschrauben für weitere CO₂-Reduktion drehen können.



Unternehmensprofil

Die BTK Befrachtungs- und Transportkontor GmbH ist ein Logistikdienstleister mit Hauptsitz in Rosenheim und Logistikzentrum in Raubling, Ortsteil Nicklheim. Das Unternehmen wurde 1939 in Hamburg als Tochter der Aschaffener Zellstoffwerke (später SCA, heute Essity) gegründet und ist seit 1999 inhabergeführte GmbH mit einem Jahresumsatz von rund 75 Millionen Euro und 310 Mitarbeitern, davon im Schnitt 20 Auszubildende.

Der Geschäftsbereich Transportlogistik realisiert mit einem eigenen Fuhrpark von 158 Zugmaschinen und 200 Aufliegern nationale und internationale Transporte als Stückgut, Teil- und Komplettladungen auf den Relationen Schweiz, Österreich, Benelux, Slowakei, Polen, Tschechien, Ungarn, Slowenien, Kroatien, Mazedonien, Serbien, Rumänien, Dänemark.

Im Geschäftsbereich Kontraktlogistik verfügt die BTK über rund 18.000 m² Fläche. Für Kunden aus Industrie und Handel organisiert sie die Logistik von der Beschaffung bis zur Distribution. Zum Portfolio gehören Lagerlogistik und Kommissionierung inklusive Mehrwertleistungen von der Konfektionierung bis zu leichten Montagearbeiten.

Zu den langjährigen Referenzen zählen unter anderem die Essity Germany, DS Smith Packaging, RKW, Stihl und BORA. Die BTK ist Mitglied im Europäischen Ladungsverbund internationaler Spediteure (ELVIS AG) und dem europaweiten Stückgutnetz International Logistics Network (ILN). Weitere Informationen unter www.btk.de.



Geleitwort DPD Schweiz

Angaben zum Unternehmen

DPD Schweiz AG

Mülibachstrasse 41

8107 Buchs ZH (Schweiz)

Marc Frank

Strategy & Innovation Director

Geleitwort

Biodiesel-, Wasserstoff-, Batterie- oder doch Flüssiggas-Antrieb? Im Zeitalter des Klimawandels sind die Optionen für einen nachhaltigen Transportweg scheinbar vielfältig und die Tür zu einer CO₂-neutralen Transportkette steht offen. Doch im professionellen Logistikumfeld merkt man schnell, es gibt noch viele Hürden zu überwinden:

Die Praxistauglichkeit der vorhandenen Möglichkeiten ist längst nicht in allen Bereichen erwiesen. Unsicherheiten, insbesondere auch auf die zu erwartenden Kosten, sorgen 2021 noch für Zurückhaltung bei der klimafreundlichen Flottenwahl. In diesem Themenblock mischt sich häufig öffentliches Halbwissen mit Vermutungen und persönlichen Präferenzen. Keine guten Voraussetzungen für einen beschleunigten Wechsel auf nachhaltige Antriebstechnologien.

Die vorliegende Studie zur CO₂-Reduktion im Strassengüterverkehr zeigt, dass alle Antriebstechnologien individuelle Vor- und Nachteile aufweisen. Eine Pauschalisierung ist also wie so oft nicht zielfördernd. Die Studie zeigt aber auch, dass die Technologien in Abhängigkeit des Einsatzzweckes sehr wohl eine gute Alternative zum traditionellen Diesel darstellen und auch hinsichtlich Kosten konkurrenzfähig sein können. Für eine CO₂-neutrale Transportkette braucht es also nicht nur die Technologie, sondern auch den Mut diese einzusetzen, sowie die Bereitschaft der Verlader diese Technologie nicht nur (zu Recht) zu fordern, sondern auch zu fördern.



Geleitwort Schöni Transport AG

Angaben zum Unternehmen

Schöni Transport AG

Neue Industriestrasse 1

4852 Rothrist (Schweiz)

Daniel Schöni

Geschäftsführer

Geleitwort

Die Schöni Transport AG hat sich ein hohes Ziel gesetzt: Wir wollen Ende 2023 als erster Logistikdienstleister in der Schweiz CO₂-neutral unterwegs sein. Dies soll zu mindestens 80% durch eigene direkte Massnahmen in der Flotte geschehen. Ein anspruchsvolles Ziel auf einer kurzen Zeitachse. Als Inhaber und gelernter Lastwagenmechaniker habe ich eine Affinität zu Verbrennungsmotoren und im Speziellen zum Aggregat von Rudolf Diesel. Der bessere Wirkungsgrad und die hohen Drehmomente faszinierten mich schon in meiner Berufslehre. Es ist daher nicht verwunderlich, dass ich den klassischen Diesel nicht für tot erkläre, sondern dem oft verpönten „Brummer“ mittels neuen liquiden Mitteln ein besseres Image verpassen möchte. Als langjähriger Transportpartner des grössten Entsorgers für Schlachtabfälle sammeln wir schon seit zehn Jahren Erfahrungen mit Bio-Diesel hergestellt aus Tierkadavern, Schlachtabfällen und Speiseresten. Was als Gegengeschäft startete, entwickelte sich zu einer langfristigen Strategie: Wir begannen damit fortlaufend, auf eigenes Risiko zu experimentieren. Allen Unkenrufen zum Trotz mischten wir bei, erhöhten den Anteil und suchten Wege und Mittel all unsere „Rudolfs“ mit Abfall zu befeuern. Dank eines Additivs und einer Bonusregelung für ökologisches Fahren, konnten wir trotz hohen Biodieselanteilen von über 50% den Treibstoffverbrauch je 100 km um rund 4% senken und damit den CO₂-Ausstoss drastisch reduzieren. Biodiesel ist nicht die einzige Errungenschaft die von sich reden macht und sicher auch nicht das Alleinseligmachende. Wir setzen daher auf einen Mix an Technologien und Verkehrsträgern, um zu sehen, welche uns wo und in welcher Form auf dem Weg zum sauberen Transportieren am meisten helfen. So beförderten wir in den letzten 15 Jahren mehr als 150'000 Auflieger per Bahn über die Alpen und haben alleine damit



32'000 Tonnen CO₂ eingespart. Seit zwei Jahren betreiben wir zudem 25 LNG (Gas) Lastwagen mit dem Ziel, diese im Jahr 2021 mit Biogas zu betreiben und damit dann zu 95% CO₂-frei unterwegs zu sein. Auch haben wir den ersten H₂-Lastwagen (Wasserstoff) in Betrieb genommen, um weitere Erfahrungen zu sammeln. Wir Transporteure brauchen Klarheit, welche Technologie für die nächsten Jahre für welchen Einsatz die Richtige ist. Fehlinvestitionen in den Fuhrpark können uns in diesen herausfordernden Zeiten schwere Schäden zuführen und sich als Sackgasse erweisen. Die Studie von Prof. Dr. Wolfgang Stölzle und seinem jungen motivierten Team rund um Julian Hess hilft uns Fuhrhaltern, nachts ruhiger zu schlafen, wissen wir nun doch schon ein bisschen mehr, welche Technologie in Zukunft punkten wird.

Daniel Schöni, Inhaber

Über die Schöni-Familie (www.schoeni.ch)

Ernst Schöni stellte im Jahre 1920 zum ersten Mal gewerblich Sauerkraut her. Aus dieser Aktivität geht die heute in 4. Generation durch die Familie geführte schoenifood.ch Sparte hervor. Sein Enkelsohn Erich hatte es indes mit Lastwagen und gründete 1969 die E. Schöni Transporte in Wynau / Bern. Aus dieser Fuhrhalterei mit einem gebrauchten FBW Lastwagen, entwickelte sich die Transport- und Logistiksparte mit dem Zugpferd der Schöni Transport AG heraus. Heute stehen in der Schöni-Gruppe täglich 1000 Mitarbeitende mit 500 eigenen Lastwagen und rund 150 Subunternehmern im Einsatz.

Management Summary

Diese Studie gibt einen Überblick über Massnahmen zur CO₂-Reduktion im Strassengüterverkehr fokussiert auf die Akteure Flottenbetreiber und Verlader. Dabei werden die Massnahmen neben ihrem CO₂-Reduktionspotenzial auch hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit und Umsetzbarkeit bewertet und miteinander verglichen. Es werden die Ergebnisse anderer wissenschaftlicher Studien durch eine umfassende Literaturrecherche zusammengefasst, um einen Überblick über Möglichkeiten zur CO₂-Reduktion zu geben. Es wurden ausserdem Interviews mit den Konsortialpartnern der Studie geführt, um deren Fachwissen zu nutzen sowie Hintergrundinformationen zu gewinnen. Für die CO₂-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus und die Total Cost of Ownership (TCO) von alternativen Antrieben wird ein Rechenkonzept erstellt. Die weiteren Massnahmen werden qualitativ betrachtet.

Es zeigt sich, dass es eine Vielzahl an Massnahmen gibt, die sowohl wirtschaftlich rentabel als auch CO₂-einsparend sind. Das CO₂-Einsparungspotenzial liegt allerdings meistens im niedrigen einstelligen Bereich. Für sehr hohe CO₂-Einsparungen sind alternative Antriebe und der Kombinierte Verkehr prädestiniert. Erstere haben jedoch den Nachteil, dass diese aktuell mit deutlich höheren TCO verbunden sind.

Es ist daher zu erwarten, dass kurzfristig die CO₂-Emissionen im Strassengüterverkehr nur geringfügig sinken werden. Für eine nachhaltige Dekarbonisierung des Strassengüterverkehrs sind technologische Fortschritte und geeignete politische Rahmenbedingungen notwendig.

Quintessenz der Studie ist, dass rentable Massnahmen für Flottenbetreiber zeitnah umsetzbar sind und CO₂-Emissionen im Strassengüterverkehr zumindest leicht senken können. Daneben ist es für die Akteure ratsam, alternative Antriebe in Pilotprojekten zu erproben, um einen Know-how-Vorsprung zu gewinnen und zukünftigen Wandel aktiv mitzugestalten.

Management Summary (English)

This study provides an overview on measures for the reduction of carbon emissions in road freight transport, focusing on the actors' fleet operators and shippers. In addition to their carbon reduction potential, measures are evaluated and compared with each other in regard to their cost effectiveness and feasibility. The results of other scientific studies are summarized through a comprehensive literature search to provide an overview of possibilities for carbon reductions. Moreover, interviews were conducted with the consortium partners of the study to make use of their expertise and to obtain background information. A calculation concept has been developed for the carbon emissions over the entire life cycle and the Total Cost of Ownership (TCO) of alternative drives. The other measures are examined qualitatively.

Examinations show that there is a large number of different measures that are both economically viable and lead to reductions of carbon emissions. However, the carbon saving is mostly in the low single-digit range. Alternative drives and Combined Transport are predestined for very high carbon emissions savings. However, the former has the disadvantage that they are currently associated with a higher TCO.

It is therefore to be expected that carbon emissions in road freight transport will only fall slightly in the short term. Technological advances and suitable political conditions are necessary for a sustainable decarbonization of road freight transport.

The quintessence of the study is that profitable measures for fleet operators and shippers can be implemented in the near future and will at least reduce carbon emissions slightly. In addition, fleet operators and shippers are advised to test alternative drives in pilot projects in order to gain a know-how advantage and to actively shape the future.



Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	V
1 Einleitung	1
1.1 Relevanz und Handlungsbedarf in der Praxis.....	1
1.2 Zielsetzung der Studie	2
1.2.1 Übergeordnete Forschungsfrage.....	3
1.2.2 Untergeordnete Forschungsfragen.....	3
1.3 Aufbau der Studie	3
2 Motivation und aktueller Status des CO₂-Ausstosses im Strassengüterverkehr (Fokus DACH-Raum)	4
2.1 Bedeutung von Verkehr im Bereich Nachhaltigkeit.....	4
2.2 Status Quo von Nachhaltigkeit in der Logistik aus Sicht der Flottenbetreiber und Verlader.....	7
3 Methodologie.....	9
3.1 Literaturrecherche/ Desk Research.....	9
3.2 Interviews mit den Praxispartnern (semi-strukturiert).....	10
3.2.1 Konzeption des Interviewleitfadens	10
3.2.2 Durchführung und Umfang der Interviews	11
3.3 Datenauswertung mittels qualitativer Inhaltsanalyse	11
3.3.1 Qualitative Inhaltsanalyse als Verfahren zur Datenauswertung.....	11
3.3.2 Konzeption des Analyserasters.....	12
3.4 Lebenszyklusanalyse	12
3.5 Total Cost of Ownership Berechnungen	13
4 Forschungsdesign: Vorgehen und Umfang	13
4.1 Cluster.....	14
4.2 Antriebstechnologien.....	14
4.3 Zu vergleichende Fahrzeugklassen.....	15
4.4 TCO Kostenpunkte	15
4.5 Lebenszyklusanalyse	16



5 CO₂-und TCO-Analyse für alternative Antriebe	16
5.1 Lebenszyklusanalyse für CO ₂ -Werte.....	16
5.1.1 Diesel als Vergleichstechnologie.....	16
5.1.2 CNG/LNG	17
5.1.3 BEV	19
5.1.4 FCEV	22
5.1.5 Biodiesel und synthetische Kraftstoffe.....	23
5.1.6 Vergleich der Antriebstechnologien.....	24
5.2 Wirtschaftliche Betrachtung mittels TCO	29
5.2.1 Diesel als Vergleichstechnologie.....	29
5.2.2 CNG/LNG	32
5.2.3 BEV	34
5.2.4 FCEV	36
5.2.5 Biodiesel und synthetische Kraftstoffe.....	37
5.2.6 Vergleich der Antriebstechnologien.....	37
6 Umfassender Vergleich der Antriebstechnologien.....	44
6.1 Paralleler Vergleich von Kosten und CO ₂ -Emissionen	44
6.2 Vergleich der Antriebstechnologien über alle Dimensionen.....	50
7 Vergleich aller Massnahmen	58
7.1 Kombinierte Betrachtung von CO ₂ -Einsparungspotenzial und Kosten	58
8 Schlussbetrachtung	60
8.1 Implikationen für Forschung und Praxis	60
8.2 Limitationen und Ausblick	61
9 Fazit	63
10 Literaturverzeichnis	65
11 Anhang.....	LXXVII
11.1 A1: Interviewleitfaden.....	LXXVII
11.2 A2: Studieninventar.....	LXXX
11.3 A3: Steckbriefe der Massnahmen.....	CI
12 Literaturverzeichnis Anhänge.....	CXCVI



Abkürzungsverzeichnis

BAFU	-	Bundesamt für Umwelt
BEV	-	Battery Electric Vehicle
BFS	-	Bundesamt für Statistik
BMK	-	Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
BMU	-	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BVL	-	Bundesvereinigung Logistik
c_a	-	CO ₂ -Emissionen des Antriebs pro kWh/Liter Treibstoff
c_{a+n}	-	CO ₂ -Emissionen von Antrieb und Fahrzeugeinsatz pro Liter (Biodiesel)
C_a	-	CO ₂ -Emissionen aus der Antriebsenergieerzeugung
c_B	-	CO ₂ -Emissionen pro kWh Speicherkapazität in der Batterieherstellung
c_f	-	CO ₂ -Emissionen pro kg Fahrzeuggewicht in der Fahrzeugherstellung
C_f	-	CO ₂ -Emissionen durch die Fahrzeugherstellung
C_n	-	CO ₂ -Emissionen durch Fahrzeugnutzung
CNG	-	Compressed Natural Gas
$c_{strommix}$	-	CO ₂ -Emissionen durch die Stromerzeugung pro kWh
d_B	-	Energiedichte einer Batterie in kWh/kg
D_J	-	Jahresfahrleistung in km
$D_{proFahrt}$	-	Reichweite
E	-	Energieverbrauch
e_D	-	Energiedichte Diesel (kWh/l)
FCEV	-	Fuel Cell Electric Vehicle
G_{Ladung}	-	Gewicht der Zuladung
G_{leer}	-	Leergewicht des Fahrzeugs
IFEU	-	Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH
K_B	-	Kapazität/Energiegehalt Batterie
KBA	-	Kraftfahrt-Bundesamt
K_F	-	Fahrzeuganschaffungskosten
k_{LSVA}	-	Kostensatz pro Tonne und Kilometer für die LSVA
K_{LSVA}	-	Kosten durch die LSVA
k_M	-	Motorkosten pro kW Leistung
k_{Maut}	-	Mautkosten pro km
K_{Maut}	-	Mautkosten
k_{Rep}	-	Reparaturkosten pro km

II

K_{Rep}	-	Reparaturkosten
k_T	-	Kosten für Herstellung Tank pro kWh Speichervermögen
F_T	-	Fassungsvermögen Tank in kWh
$K_{T,D}$	-	fixe Kosten für einen Dieseltank
L	-	Einsatzdauer in Jahren
LNG	-	Liquified Natural Gas
LSVA	-	Leistungsabhängige Schwerverkehrsabgabe
M_B	-	Masse der Batterie in kg
p	-	Treibstoffkosten pro Mengeneinheit
P	-	Treibstoffkosten
P_M	-	Motorenleistung in kW
SGKV	-	Studiengesellschaft für den kombinierten Verkehr e.V.
UBA	-	Umweltbundesamt in Deutschland
uba	-	Umweltbundesamt in Österreich
u_{fh2}	-	Umrechnungsfaktor für den Wirkungsgrad der Wasserstoffherstellung
V	-	Dieserverbrauch pro 100km
η	-	Wirkungsgrad

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau der Studie in fünf Phasen (eigene Darstellung)	3
Abbildung 2: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Verkehr (eigene Darstellung)	7
Abbildung 3: Die fünf Phasen einer Lebenszyklusanalyse (eigene Darstellung)	13
Abbildung 4: Cluster der Massnahmen (eigenes Modell).....	14
Abbildung 5: CO ₂ -Emissionen der Antriebstechnologien mit deutschem Strommix (eigene Darstellung)	24
Abbildung 6:CO ₂ -Emissionen der Antriebstechnologien mit Schweizer Strommix (eigene Darstellung)	25
Abbildung 7:CO ₂ -Emissionen der Antriebstechnologien mit Strom aus erneuerbaren Energien (eigene Darstellung).....	26
Abbildung 8:CO ₂ -Emissionen der Antriebstechnologien mit Strom aus erneuerbaren Energien für Sprinter (eigene Darstellung)	27
Abbildung 9: Wirkungsgrade der Antriebstechnologien (eigene Darstellung) angelehnt an Randelhoff (Randelhoff, 2020)	28
Abbildung 10: TCO für 40-Tonner in der Schweiz (eigene Darstellung).....	38
Abbildung 11: TCO für 40-Tonner in Deutschland (eigene Darstellung)	40
Abbildung 12: TCO für 40-Tonner in Österreich (eigene Darstellung).....	40
Abbildung 13: TCO von Sprintern in der Schweiz (eigene Darstellung)	41
Abbildung 14:TCO von Sprintern in Deutschland (eigene Darstellung).....	41
Abbildung 15: TCO von Sprintern in Österreich (eigene Darstellung)	42
Abbildung 16: CO ₂ - und Kostenvergleich für 40-Tonner in Deutschland (eigene Darstellung)	45
Abbildung 17: CO ₂ - und Kostenvergleich für 40-Tonner in Deutschland mit Strom aus erneuerbaren Energien (eigene Darstellung).....	46
Abbildung 18: CO ₂ - und Kostenvergleich für 40-Tonner in der Schweiz (eigene Darstellung)	47
Abbildung 19: CO ₂ - und Kostenvergleich für 40-Tonner in Österreich (eigene Darstellung)	48
Abbildung 20: Nutzlastverluste für BEV und FCEV (eigene Darstellung angelehnt an RolandBerger)	51
Abbildung 21: Nutzlastverluste von BEV gegenüber Diesel (eigene Darstellung)	52
Abbildung 22: Eignungsprofil der Antriebstechnologien hinsichtlich Reichweite und Nutzlast (eigene Darstellung)	54
Abbildung 23: Spinnendiagramm der Antriebstechnologien Diesel, CNG und LNG (eigene Darstellung)	56
Abbildung 24: Spinnendiagramm der Antriebstechnologien BEV, FCEV und Biodiesel (eigene Darstellung)	57



Abbildung 25: CO ₂ -Einsparungen und Wirtschaftlichkeit aller untersuchten Massnahmen (eigene Darstellung)	58
Abbildung 26: Empfehlungscluster zur Umsetzung der Massnahmen (eigene Darstellung) ..	59
Abbildung 27 : Funktionsweise Geofencing (Trailer world, 2014)	CI
Abbildung 28: Rentabilität Seitenverkleidung Optiflow (eigene Darstellung).....	CXII
Abbildung 29: Rentabilität Heckklappen Optiflow (eigene Darstellung).....	CXIII
Abbildung 30: Rentabilität Berger Ecotrailer (eigene Darstellung).....	CXVIII
Abbildung 31: Batterieelektrisches Auto (Deutsche Energie-Agentur GmbH, o.D.).....	CXIX
Abbildung 32: Aufbau eines Elektromotors (Günter Pauli GmbH, 2017).....	CXIX
Abbildung 33: Elektro Lkw angeschlossen an einer Oberleitungsanlage (Finke, 2020).	CXXIII
Abbildung 34: Funktionsweise einer Brennstoffzelle (Schmidt, 2020).....	CXXIV
Abbildung 35: Aufbau und Lokalisation einer Brennstoffzelle (Scania, 2020a; Hüppi, 2019).....	CXXIV
Abbildung 36: Aufbau eines Dieselmotors (Duden, Learnattack, o.D.).....	CXXVIII
Abbildung 37: Aufbau einer CNG & LNG Tankstelle (Klukas et al., 2017)	CXLI
Abbildung 38: Tankstellenkonzepte für H2-Infrastrukturszenarien (Ehret ,2020; Arlt & Obermeier,2017).....	CXLV
Abbildung 39: Darstellung der Platooning Technik (Tsukuba, et al., 2016)	CXLIX
Abbildung 40: Pilotfahrzeuge von MAN im Praxistest (Reus, 2018).....	CLIII
Abbildung 41: Rentabilität Platooning (eigene Darstellung).....	CLIV
Abbildung 42: Kosten Nutzen Vergleich des Fahrertrainings (eigene Darstellung)	CLXXIV
Abbildung 43: Anschauliche Auswirkungen der Lage der Umschlagterminals auf die Gesamtstrecke des kombinierten Verkehrs (IFEU & SGKV, 2002).....	CLXXXIV

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Höhe der LSV A für verschiedene Euroklassen.....	30
Tabelle 2: Höhe der österreichischen Maut in Abhängigkeit von der Achsenanzahl	31
Tabelle 3: Maut in Österreich für verschiedene Fahrzeuggewichte.....	31
Tabelle 4: Maut in Deutschland für verschiedene Fahrzeuggewichte (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2019).....	32
Tabelle 5: Verwendete Mautsätze für Deutschland.....	32
Tabelle 6: Höhe der Maut in Österreich für elektrische Nutzfahrzeuge	35
Tabelle 7: Höhe der Maut für elektrische Nutzfahrzeuge in Abhängigkeit vom Fahrzeuggewicht	35
Tabelle 8: Die Emissionen von 40-Tonner und Sprinter im Vergleich.....	49
Tabelle 9: Kosten für einen Schnelllader nach Kilowattleistung	CXL
Tabelle 10: CO ₂ -Einsparungen nach Automatisierungsstufe und Penetrationsrate	CLIX
Tabelle 11: Kosten eines Lastenrads im Vergleich zu Fahrrad und Pkw.....	CLXXIX





1 Einleitung

1.1 Relevanz und Handlungsbedarf in der Praxis

Das Treibhausgas Kohlenstoffdioxid (CO_2) ist aus den Diskussionen rund um den Klimawandel nicht mehr wegzudenken. Es ist mit einem weltweiten Gesamtanteil von ca. 74% das am häufigsten vorkommende von insgesamt sieben im Kyoto-Protokoll gelisteten Treibhausgasen (alle anderen werden in CO_2 -Äquivalente umgerechnet) und damit für den Grossteil des durch den Menschen verursachten Klimawandels verantwortlich (Ge & Friedrich, 2020). Der natürliche Abbauprozess von CO_2 in der Atmosphäre dauert mehrere hunderttausend Jahre, was die globale und politische Priorität von Nachhaltigkeitsbestrebungen unterstreicht. Das Kyoto-Protokoll bildet einen ersten grossen Meilenstein solcher internationaler Nachhaltigkeitsbestrebungen, da in Folge dessen erstmals nationale Ziele für Emissionswerte definiert wurden. Aktuelle Ziele des Klimaschutzes werden im Pariser Abkommen definiert, welches das Kyoto Protokoll ablöst und Staaten ab 2020 zu selbst gesetzten Reduktionszielen verpflichtet. Um die globalen Treibhausgas-Emissionen zu reduzieren und die Klimaschutzziele zu erreichen, ist eine gemeinschaftliche Anstrengung erforderlich. Dies betrifft auf nationaler Ebene alle Wirtschaftssektoren und somit neben Industrie und Gebäuden auch den Verkehrssektor.

Im Gegensatz zu allen anderen Wirtschaftssektoren stagnieren bzw. steigen die CO_2 -Emissionen im Verkehrssektor seit 1990 in den DACH-Ländern. Der Anstieg der Transportleistung im Strassengüterverkehr über viele Jahre hat die Effizienzsteigerungen gängiger Diesel-Motoren überkompensiert. Um die Klimaziele realisieren zu können, sind hier dringend geeignete Massnahmen zur Reduktion von CO_2 -Emissionen notwendig. Für Akteure im Strassengüterverkehr (Flottenbetreiber und Verlader) existieren durchaus bereits unterschiedliche Massnahmen zur Reduktion von Emissionen im Strassengüterverkehr. Diese reichen von alternativen Antrieben bis hin zu Optimierungen im Transportmanagement und angrenzenden Logistikprozessen. Für diese Fülle an Massnahmen fehlt allerdings bisher eine insbesondere auf die genannten Akteure im Strassengüterverkehr zugeschnittene, einheitliche Vergleichsbasis hinsichtlich Emissions-Reduktionspotenzial, Wirtschaftlichkeit und Umsetzbarkeit.

Flottenbetreiber und Verlader werden nicht zuletzt durch die steigende Sensibilisierung von Kunden zunehmend mit Erwartungen an ein «Mehr» an Nachhaltigkeit konfrontiert. Eine aktuelle Studie der BVL hat ergeben, dass Nachhaltigkeit ein immer bedeutenderes Vergabekriterium und daher ein in Zukunft entscheidender Wettbewerbsvorteil sein wird

(Kersten et al, 2020). Die notwendige Auseinandersetzung und Bewertung geeigneter Massnahmen zur Reduktion von Emissionen muss von Flottenbetreibern und Verladern neben dem operativen Tagesgeschäft bewältigt werden. Hinzu kommt, dass der Transfer von wissenschaftlichen Ergebnissen auf den eigenen Anwendungsfall eine Herausforderung darstellt. Genau hier setzt diese Studie an. Es wird ein Katalog von Massnahmen zur CO₂-Reduktion im Strassengüterverkehr für Praktiker dargestellt, welcher Reduktionsmassnahmen in einer einheitlichen und übersichtlichen Steckbriefform beschreibt, analysiert und vergleichbar macht. Alle Ergebnisse basieren auf wissenschaftlichen Erkenntnissen und bilden die Zusammenfassung einer Vielzahl von Studien. Die vorliegende Studie kann daher auch als Meta-Studie verstanden werden, die Informationen bündelt und Zusammenhänge aufzeigt. Ein Alleinstellungsmerkmal dieser Studie liegt darin, den beiden Akteuren Flottenbetreiber und Verloader einen umfassenden Überblick über aktuelle Massnahmen zu gegeben, mit denen sich die jeweiligen CO₂-Emissionen im Strassengüterverkehr reduzieren lassen.

1.2 Zielsetzung der Studie

Zielsetzung der Studie ist die Aufstellung aller für den Transportprozess im Strassengüterverkehr relevanten Massnahmen zur Reduktion von CO₂-Emissionen in einem einheitlichen Cluster sowie die Schaffung einer Vergleichsbasis der Massnahmen, aus der die Akteure Flottenbetreiber und Verloader individuelle Umsetzungen ableiten können. Für die Lösung komplexer Herausforderungen, wie sie der Klimawandel darstellt, besteht die Notwendigkeit, mit einer Vielzahl von Akteuren aus verschiedenen Bereichen zu agieren. Diese Bedeutung wird umso grösser, je mehr Kunden Energieeffizienz, Klimaschutz und Kosten von den Dienstleistern fordern (Gregori & Wimmer, 2011, S.25). Dazu möchte die Studie einen Beitrag leisten, indem sie Verloader und Flottenbetreiber an einen Tisch bringt und einen konstruktiven Diskurs anregt. Beide Perspektiven finden Berücksichtigung in der Betrachtung der zahlreichen Reduktionsmassnahmen.

Die Studie sieht eine ganzheitliche und einheitliche Betrachtung der verschiedenen Massnahmen vor und stellt dadurch eine Vergleichbarkeit her. Der Schwerpunkt der Studie liegt dabei auf umfassenden Emissions-Berechnungen und der wirtschaftlichen Betrachtung der Total Cost of Ownership (TCO). Bezüglich der CO₂-Emissionen unterschiedlicher Antriebstechnologien werden alle Lebenszyklusphasen der jeweiligen Technologien mittels Lebenszyklusanalyse in die Betrachtung involviert. Diese umfangreiche Berücksichtigung über die unterschiedlichen Lebensphasen (Cradle-to-grave) einer Technologie hinweg



gewährleistet eine umfassende Vergleichbarkeit unter Einbezug aller CO₂-Emissionen pro Antriebstechnologie.

Durch die umfangreiche und vielseitige Bewertung verschiedener Massnahmen etabliert die Studie einen Status Quo von Reduktions-Massnahmen hinsichtlich der Aspekte Wirtschaftlichkeit, CO₂-Reduktionspotenzial und Umsetzbarkeit. Ebenfalls einbezogen werden der spezifische Reifegrad und eine Prognose zur technischen Entwicklung. Somit wird Praktikern ein ganzheitlicher Überblick über die Potenziale der einzelnen Massnahmen ermöglicht. Ausgehend von dieser Zielsetzung wurden die drei Forschungsfragen der Studie formuliert.

1.2.1 Übergeordnete Forschungsfrage

F0: Mit welchen Massnahmen und Massnahmen-Kombinationen kann eine CO₂-Reduktion im Strassengüterverkehr erzielt werden?

1.2.2 Untergeordnete Forschungsfragen

F1: Welche Massnahmen existieren für die Prozesse im Strassengüterverkehr?

F2: Wie sind diese Massnahmen hinsichtlich CO₂-Reduktionspotenzial, Wirtschaftlichkeit und Umsetzbarkeit zu bewerten?

F3: Welche Potenziale weisen die einzelnen Massnahmen auf und wie schneiden diese im direkten Vergleich zueinander ab?

1.3 Aufbau der Studie

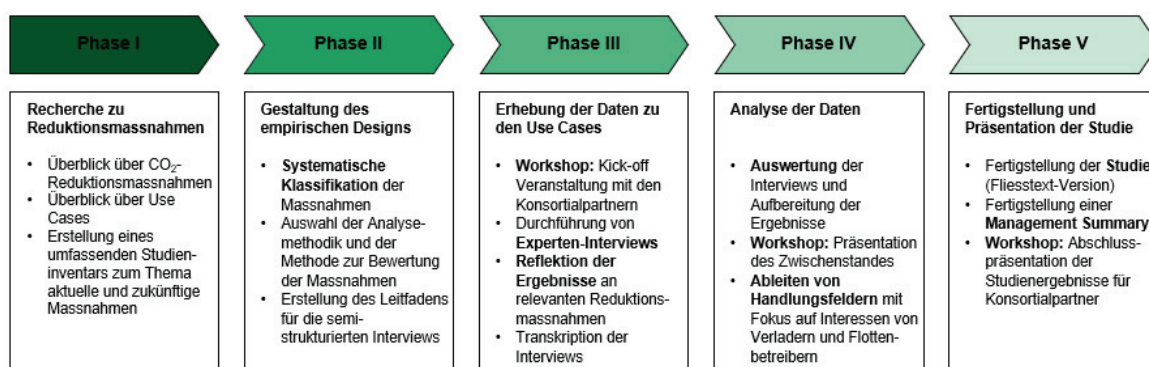


Abbildung 1: Aufbau der Studie in fünf Phasen (eigene Darstellung)

Die Studie lässt sich in fünf Phasen unterteilen. Dabei wird zuerst eine umfassende Recherche zu den Reduktionsmassnahmen im Strassengüterverkehr durchgeführt und ein umfassendes Studieninventar erstellt. In Phase zwei und drei werden die vorher identifizierten

4 Motivation und aktueller Status des CO₂-Ausstosses im Strassengüterverkehr (Fokus DACH-Raum)

Massnahmen klassifiziert. Anschliessend führt das Studienteam mehrere Experteninterviews. Die Auswertung erfolgt in der vierten Phase der Studie. Schliesslich werden den Konsortialpartnern die Studienergebnisse in einer Präsentation vorgestellt, bevor die Verfassung und Fertigstellung der Studie in schriftlicher Form beginnen.

Die Studie besteht aus insgesamt 9 Kapiteln. Im folgenden Kapitel 2 wird zunächst die Motivation zur Studie genauer erläutert. Dabei wird sowohl die Rolle des Verkehrs detailliert betrachtet als auch der aktuelle Forschungsstand zu Nachhaltigkeit in der Logistik anhand einer Studie aufgezeigt. Das 3. Kapitel beschreibt die Methodologie und das Vorgehen der empirischen Untersuchung. Daraufhin werden in Kapitel 4 die einzelnen Massnahmen und das entwickelte Cluster vorgestellt. Das folgende Kapitel 5 fokussiert sich ausschliesslich auf die Berechnungen der CO₂-Emissionen und der TCO von alternativen Antrieben. In Kapitel 6 werden die alternativen Antriebe über alle Kriterien bewertet. Anschliessend werden alle Massnahmen in Kapitel 7 verglichen. Die abschliessende Betrachtung inklusive Implikationen für die Praxis erfolgt in Kapitel 8. Schliesslich wird in Kapitel 9 ein Fazit gezogen. Im Anhang findet der Leser den A1: Interviewleitfaden, das A2: Studieninventar und die A3: Steckbriefe der Massnahmen.

2 Motivation und aktueller Status des CO₂-Ausstosses im Strassengüterverkehr (Fokus DACH-Raum)

2.1 Bedeutung von Verkehr im Bereich Nachhaltigkeit

Für die Anstrengungen und Bemühungen gegen den globalen Klimawandel stellt das Kyoto Protokoll ein zentrales Dokument dar, denn es legte erstmals verbindliche Ziele für Emissionswerte von Treibhausgasen fest. Es wurde 1997 verfasst und in den folgenden Jahren von einer Vielzahl von Staatsoberhäuptern weltweit ratifiziert. Schon damals kam dem Transportsektor eine Schlüsselrolle zu, denn seine Emissionen hatten sich von 1971 bis 1997 in den OECD Nationen fast verdoppelt (IEA, 2000). Die 2012 entworfene zweite Verpflichtungsperiode nannte weitere Reduktionsziele bis 2020. Auch Deutschland, Österreich und die Schweiz unterzeichneten die Verträge für die zweite Periode (BAFU, 2018a).

Aktuelle Ziele des Klimaschutzes wurden durch das Pariser Abkommen aktualisiert und vertieft, welches 2016 in Kraft trat und seine Mitglieder zu der Definition von nationalen Reduktionszielen für den Zeitraum nach 2020 verpflichtet (BAFU, 2018b). Das Übereinkommen ist rechtlich verbindlich und wurde mittlerweile von über 196 Parteien



unterzeichnet. Die Staatengemeinschaft möchte damit die Erderwärmung auf maximal 2 Grad im Vergleich zu vorindustriellen Temperaturen beschränken, wobei 1,5 Grad bevorzugt werden (UN, 2021).

Der Ausstoss von Treibhausgasemissionen wird üblicherweise für einzelner Länder betrachtet. Der Fokus dieser Studie liegt auf dem DACH-Raum. Des Weiteren wird die nationale Verteilung prozentual in verschiedene Kategorien aufgeschlüsselt. So werden nationale Emissionen in die Bereiche Energie, Industrie, Landwirtschaft und Abfall verteilt. Der Transport wird unter den energiebedingten Treibhausgasemissionen geführt. Der Verkehrssektor stellt insofern eine Besonderheit dar, als dass seine Emissionen im Gegensatz zu allen anderen Sektoren im Zeitraum von 1990 bis 2018 nicht abnehmen, sondern stagnieren oder sogar leicht steigen. In Deutschland wurden 1990 165 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente vom Verkehr verursacht. 2018 lag der Wert mit 164 Millionen nur eine Tonne unter dem Referenzwert von 1990 (UBA, 2020b). In Österreich stieg der Emissionswert des Transportsektors um 10,1 Millionen Tonnen auf 23,9 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente von 1990 bis 2018 (uba, 2018, S.14). Auch in der Schweiz stiegen die vom Transport verursachten Emissionen auf einen Wert von 15,04 Millionen Tonnen in 2018, im Vergleich zu 14,9 Millionen Tonnen in 1990 (BAFU, 2020, S.11).

Innerhalb des Verkehrssektors kommt dem Strassengüterverkehr eine grosse Bedeutung zu. 2018 machten in Deutschland Nutzfahrzeuge der Strasse einen Anteil von 35,1% der gesamten Emissionen des Verkehrssektors aus (BMU, 2020, S.36). Während in Österreich 97% der Transportemissionen auf den Strassenverkehr zurückzuführen sind, ist der Strassengüterverkehr für einen Anteil von 36% verantwortlich (UBA, 2020c, S.105). In der Schweiz belief sich 2018 der Anteil des Strassengüterverkehrs auf 20,15% an den Emissionen des Verkehrssektors (BAFU, 2020, S.17).

Die Verantwortung des Strassengüterverkehrs wird verstärkt durch seinen durchschnittlichen Emissionsausstoss von 112 Gramm pro Tonnenkilometer. Zwar ist der Ausstoss für per Flugzeug transportierte Güter mit 713 Gramm pro Tonnenkilometer deutlich höher, doch hat der Flugverkehr am Gütertransport nur einen sehr kleinen Gesamtanteil von ca. 0,2 Prozent. Im Kontrast dazu stösst ein Binnenschiff nur 31 Gramm pro Tonnenkilometer aus und der Güterzug ist mit einem Wert von 18 Gramm pro Tonnenkilometer das umweltfreundlichste Transportmittel (BMU, 2020, S. 38). Gemessen an der Transportleistung stellt der Strassengüterverkehr das mit Abstand wichtigste Gütertransportmittel in Deutschland dar. 2017 fielen ihm über 500 Milliarden Tonnenkilometer zu, was einem Anteil von 71,6%

6 Motivation und aktueller Status des CO₂-Ausstosses im Strassengüterverkehr (Fokus DACH-Raum)

entspricht (BMU, 2020, S.38). Der Lkw kann als das mit Abstand wichtigste Transportmittel des Güterverkehrs im DACH-Raum bezeichnet werden.

Betrachtet man die Verwendung verschiedener Kraftstoffe im Strassengüterverkehr, wird schnell ersichtlich, dass Diesel eine Schlüsselrolle besetzt. 94% der deutschen Lkw und Zugmaschinen verwenden Diesel als Kraftstoff (KBA, 2019, S. 8).

Während die Dieseltechnologie über die letzten Jahrzehnte effizienter geworden ist, kam es parallel zu einer Zunahme des Verkehrsaufkommens. Die Transportleistung im Strassengüterverkehr stieg von 1995 bis 2018 um 81%, was die Effizienzsteigerung der Dieselmotoren von 32,7% überkompensierte (UBA, 2020d).

Massnahmen zur CO₂-Reduktion im Strassengüterverkehr werden in den nächsten Jahren eine noch entscheidendere Bedeutung im Kampf gegen den Klimawandel einnehmen, denn der Strassengüterverkehr wächst laut Prognosen weiter. In Deutschland soll die Strassengüterverkehrsleistung in 2030 607 Milliarden Tonnenkilometer erreichen und somit im Vergleich zu 2017 über 20% wachsen (VDA, 2020). Für Österreich wird ein Wachstum von 32% prognostiziert, sodass die 39,7 Milliarden im Jahr 2010 gefahrenen Tonnenkilometer auf 52,4 Milliarden Tonnenkilometer in 2025 ansteigen werden (BMK, 2020). Auch in der Schweiz wird ein Wachstum erwartet. So wird die Leistung des Strassengüterverkehrs von 17,7 Milliarden Tonnenkilometern in 2018 (BFS, 2019, S.1) laut Prognosen um 10% auf 19,5 Milliarden Tonnenkilometer in 2030 ansteigen (Stölzle et al., 2015, S.12).

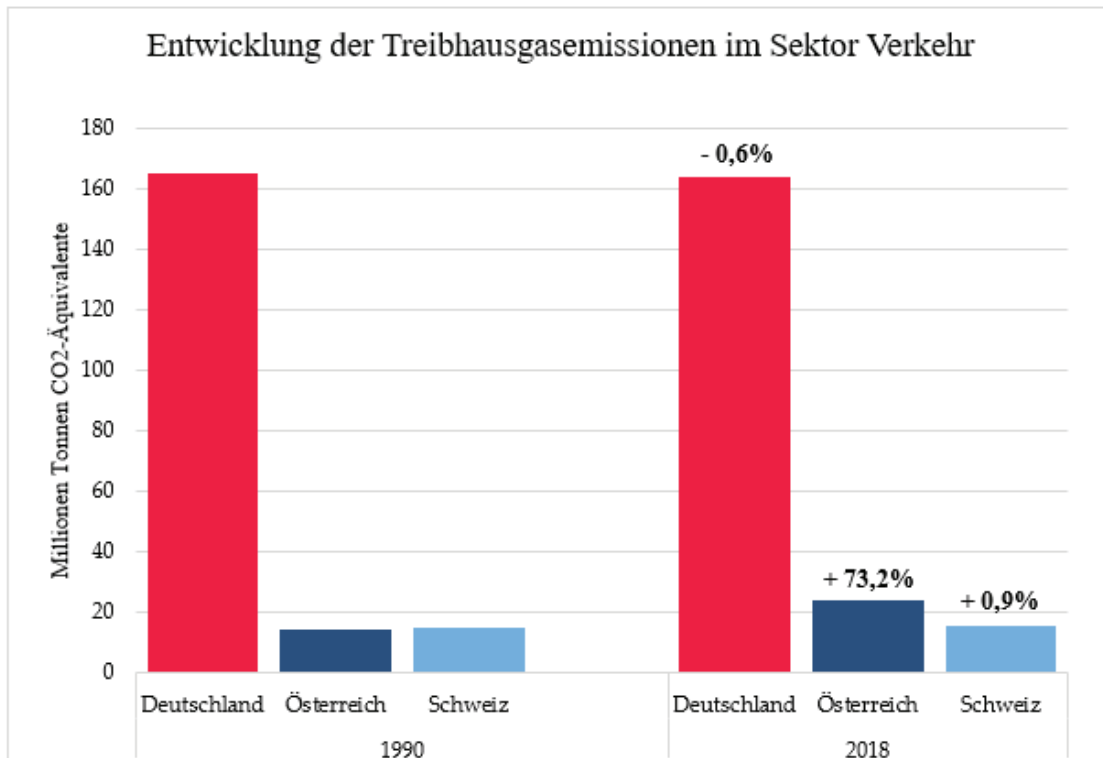


Abbildung 2: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Sektor Verkehr (eigene Darstellung)

2.2 Status Quo von Nachhaltigkeit in der Logistik aus Sicht der Flottenbetreiber und Verlader

Die Bundesvereinigung für Logistik (BVL) betrachtet schon seit 30 Jahren «Trends und Strategien in der Logistik und im Supply Chain Management». Die Datenerhebung zur 14. Auflage der Studienreihe wurde im Frühjahr 2020 durchgeführt und zeigt eindeutig, dass Nachhaltigkeit für die mehr als 300 befragten Unternehmen ein zukunftsrelevantes Thema darstellt.

In Punkto Verantwortung sehen die Befragten aus Handel, Industrie und Logistik die grösste Pflicht in der Politik (55%) und bei den Endkunden (50%). Die Verantwortung der Verlader schätzen 33% der Teilnehmenden als sehr hoch an. Bei den Logistikdienstleistern sind es 27%. Jedoch wird die Verantwortung insgesamt in allen vier Kategorien von über 70% der Teilnehmenden als sehr hoch bis hoch bewertet (Kersten et al, 2020, S.21).

Die Befragung ergab ausserdem, dass die folgenden drei Massnahmen als die relevantesten Massnahmen in Hinblick auf mehr Nachhaltigkeit bewertet wurden: Optimierung der Fahrtenauslastung, Umrüstung des Unternehmensgeländes (bspw. Beleuchtung und Solaranlagen) und Stärkung des Umweltbewusstseins der Mitarbeitenden (Kersten et al, 2020, S.22).

8 Motivation und aktueller Status des CO₂-Ausstosses im Strassengüterverkehr (Fokus DACH-Raum)

Nachhaltigkeit konnte in der Studie klar als wichtiger Trend identifiziert werden, denn die Anfragen für nachhaltige Logistik nehmen zu. 26% der befragten Logistikdienstleister gaben an, bereits jetzt sehr häufig oder häufig nach nachhaltigen Transporten gefragt zu werden. Mehr als 60% gehen davon aus, dass sich dieser Anteil in der Zukunft weiter erhöht. Knapp ein Viertel der Verlader bekundete, bereits heute bei sehr vielen oder vielen Aufträgen Nachhaltigkeit zu fordern. 65% der Teilnehmenden antworteten bei sehr vielen oder vielen Aufträgen Nachhaltigkeit in den nächsten fünf Jahren zu fordern (Kersten et al, 2020, S.24-25).

Dieser vermehrte Wunsch nach Nachhaltigkeit steht im starken Kontrast zur wahrgenommenen Zahlungsbereitschaft. So schätzen momentan nur 4% der Teilnehmenden die Bereitschaft der eigenen Kunden, für nachhaltige Logistikleistungen mehr zu zahlen als sehr hoch oder hoch ein. Zwar liegt der Anteil der Teilnehmenden, die eine hohe oder sehr hohe Zahlungsbereitschaft der Kunden in den nächsten fünf Jahren schätzen, mit 27% deutlich höher, trotzdem taxieren 41% diese Zahlungsbereitschaft der Kunden weiterhin als gering oder sehr gering (Kersten et al, 2020, S.26).

Nachhaltigkeit ist laut einer BVL-Studie (Kersten et al, 2020) in der Logistik längst ein entscheidender Faktor für den Wettbewerb geworden. Es stellt sich aber die Frage, ob überhaupt konkrete und Implementierungs-fähige Reduktions-Massnahmen für Akteure zur Verfügung stehen. Und wenn ja, welche? Bisherige Studienergebnisse zeigen, dass eine Fülle an unterschiedlichen Massnahmen zur CO₂-Reduktion für Akteure im Strassengüterverkehr existieren. Eine Vergleichbarkeit von Einsparungsraten und die jeweilige gegenüberstellende Bewertung von Effizienz, Marktreife und Anwendung ist allerdings in den meisten Fällen nicht oder nur teilweise möglich, da sich empirische Daten häufig aufgrund verschiedener Annahmen und Methoden innerhalb der Studien unterscheiden, was in einer mangelnden Vergleichbarkeit der Ergebnisse resultiert. Flottenbetreiber sehen sich daher mit herausfordernden Entscheidungen konfrontiert, wenn es um die Auswahl von Massnahmen für das eigenen Unternehmen geht. Es gilt, neben dem fordernden Tagesgeschäft eine Vielzahl von Massnahmen mit einem einheitlichen Vergleichsmassstab gegenüberzustellen. Daraus ergibt sich die wichtigste Motivation der Konsortialpartner, an dieser Studie teilzunehmen.

Die Gründe für Flottenbetreiber und Verlader, sich mit Massnahmen zur CO₂-Reduktion im Strassengüterverkehr auseinander zusetzen, sind zahlreich und vielfältig. Neben monetären Aspekten und der damit einhergehenden Vorbereitung auf eine CO₂-Steuer, besteht auf



sozial-ökologischer Ebene eine hohe gesellschaftliche Verantwortung. Diese kommt durch nationale Reduktionsziele ebenso wie durch internationale Abkommen zum Ausdruck. Darüber hinaus können eine frühzeitige Adaption und das Adressieren des Kundenbedürfnisses nach nachhaltiger Logistik, zukünftig einen Wettbewerbsvorteil kreieren.

3 Methodologie

Für eine hinreichende Transparenz und Nachvollziehbarkeit der wissenschaftlichen Studienergebnisse ist die Kenntnis über die eingesetzten Methoden Voraussetzung. Dafür wird ein Überblick des Forschungsdesign und des Vorgehens gegeben. Die Studie folgt im Kern einem qualitativem Forschungsansatz, der von einigen quantitativen Berechnungen ergänzt wird. Ausgangspunkt der Untersuchung war eine sehr umfangreiche Literaturrecherche, auf die mehrere Experteninterviews folgten. Ausserdem wurden umfassende TCO-Berechnungen für alternative Antriebe durchgeführt und verschiedene Technologien hinsichtlich ihres CO₂-Austosses verglichen.

3.1 Literaturrecherche und Desk Research

Das Suchfeld zur Analyse der vorhandenen Literatur besteht aus Massnahmen zur Reduktion von Emissionen im Strassengüterverkehr. Dazu zählen verschiedene Antriebstechnologien, Alternativen für Logistikprozesse und Massnahmen bezüglich der Infrastruktur sowie für das Transportmanagement. Aus den identifizierten Massnahmen wurde ein Cluster erstellt (siehe Kapitel 4). Ausgehend von diesem Cluster werden die Massnahmen verglichen und mit den aufbereiteten recherchierten Daten pro Massnahme ein Steckbrief erstellt. Die Steckbriefe folgen einer einheitlichen Struktur und enthalten Ergebnisse zu den folgenden Aspekten: Definition, Funktionsbeschreibung, Marktreife, Verbreitungsgrad, SWOT-Analyse, Anbieter, Pilotprojekte, Kosten. Die recherchierten Daten umfassen neben einer Vielzahl an möglichen Massnahmen auch CO₂-Werte, Kosten und Studienergebnisse, die als Grundlage für eigene Berechnungen verwendet werden. Um die notwendige Vergleichbarkeit zu gewährleisten, müssen im Bedarfsfall Werte an die gewählten Konfigurationen der Studie angepasst werden.

Die ausführliche Literaturrecherche kann so ein genaues Abbild des aktuellen Erkenntnisstands aufzeigen, der als Basis für das weitere Vorgehen fungiert. Die verwendeten Quellen der Literaturrecherche beschränken sich dabei auf wissenschaftliche Literatur wie peer-reviewed Zeitschriftenbeiträge, wissenschaftliche Studien mit publizierten Forschungsergebnissen und vereinzelt praxisnahe Studien. Ausgehend von der Literaturrecherche wurde ausserdem ein umfassendes A2: Studieninventar zu den



verschiedenen Antriebstechnologien erstellt. Um möglichst aktuelle Ergebnisse abzubilden, werden nur Studien der letzten drei Jahre (2017 bis einschliesslich 2020) berücksichtigt.

3.2 Interviews mit den Praxispartnern (semi-strukturiert)

Interviews stellen eine qualitative Forschungsmethode dar. Sie wurden in Form von semi-strukturierten Experteninterviews mit den Konsortialpartnern für diese Studie durchgeführt. Dazu zählen Berger Logistik GmbH, BTK Befrachtungs- und Transportkontor GmbH, Schöni Transport AG, DPD (Schweiz) AG, HP Deutschland GmbH und Robert Bosch GmbH. Die Befragung von Verladern und Logistikdienstleistern stellt sicher, dass beide Perspektiven in der Studie berücksichtigt werden.

Im Rahmen dieser Studie wurden semi-strukturierte Interviews oder auch «geleitete Konversationen» durchgeführt, welche sich an einem Leitfaden mit vorab formulierten themenspezifischen Fragen orientierten. Im Gegensatz zu strukturierten Interviews ermöglichen semi-strukturierte Interviews dem Interviewten persönliche Ansichten und weitere Einschätzungen miteinzubringen. Des Weiteren ermöglicht diese Methode zusätzliche Ad hoc Fragen und konkretere Nachfragen zu gegebenen Antworten (Gläser & Laudel, 2010, S.41 f.) und erlaubt somit mehr Freiraum für die individuellen Kompetenzen und Tätigkeitsbereiche der Interview-Partner.

3.2.1 Konzeption des Interviewleitfadens

Ausgehend von dem Erkenntnisstand zu aktuell verfügbaren Massnahmen hinsichtlich der CO₂-Reduktion im Strassengüterverkehr wird ein umfangreicher Interviewleitfaden¹ konzipiert, der die Grundlage der Experteninterviews bildet. Gegenstand der Interviews sind die eigenen Erfahrungen der Konsortialpartner bezüglich verschiedener Massnahmen zur CO₂-Reduktion und die verwendeten Fahrzeugkonfigurationen der jeweiligen Unternehmen. Der Interviewleitfaden gliedert sich in drei übergeordnete Fragenkomplexe. Ziel des ersten Komplexes ist es, die Konfiguration der eigenen Flotte oder der gewählten Dienstleister bei fremdvergebenen Leistungen zu erfragen. Fragenkomplex zwei fokussiert sich auf die TCO-Berechnungen und fragt deshalb nach den Präferenzen des jeweiligen Konsortialpartners. Der dritte Fragenkomplex bezieht sich auf die Massnahmen zur CO₂-Reduktion, die vom jeweiligen Unternehmen bereits umgesetzt oder geplant wurden. Erfragt werden der Kontext dieser Projekte, zusätzlich aber auch das Interesse für weitere Massnahmen.

¹ Siehe dazu Anhang A2.



Die vielseitigen Fragen bezüglich der Interessengebiete der Konsortialpartner, der Motive und Hintergründe zur Bedeutung der Nachhaltigkeit in den Unternehmen, zielen darauf ab, ein ganzheitliches Bild der Situation in der Praxis zu zeichnen. Die Inhalte des Interviewleitfadens wie beispielsweise die Fahrzeugklassen werden vorab durch die Konsortialpartner validiert und vor Beginn der Feldphase einem Vortest unterzogen.

3.2.2 Durchführung und Umfang der Interviews

Insgesamt werden sechs Experteninterviews, jeweils eines pro Konsortialpartner, im Rahmen der Studie geführt. Die Interviews werden teils persönlich und teils am Telefon durchgeführt. Die Antworten werden schriftlich in einem Fragebogen festgehalten. Ausserdem werden die Interviews aufgenommen und anschliessend transkribiert. Für die Sicherstellung einer konsistenten und vergleichbaren Gesprächsführung werden die Interviews immer von der gleichen Person geleitet. Der Zeitrahmen pro Interview beträgt zwischen ein bis zwei Stunden. Die Interviewergebnisse werden bei den Konsortialtreffen präsentiert und können so von den Gesprächspartnern überprüft und validiert werden.

3.3 Datenauswertung mittels qualitativer Inhaltsanalyse

Für einen qualitativen Forschungsansatz müssen Daten, die in Textform vorhanden sind, analysiert und interpretiert werden. Im Falle dieser Studie handelt es sich bei den Textdaten sowohl um Primärdaten aus den selbst erhobenen Experteninterviews als auch um Sekundärdaten, die das Ergebnis der Literaturrecherche bilden. Die beschriebenen Daten werden mit Hilfe der „qualitativen Inhaltsanalyse“ nach Gläser und Laudel (2010) systematisch ausgewertet. Eine kurze Beschreibung der gewählten Methode schliesst sich in den folgenden zwei Unterkapiteln an.

3.3.1 Qualitative Inhaltsanalyse als Verfahren zur Datenauswertung

Für eine bestmögliche Untersuchung hinsichtlich der Forschungsfragen wurde ein vergleichender und ganzheitlicher Ansatz gewählt, der am besten mit einer qualitativen Inhaltsanalyse umgesetzt werden kann.

Dafür werden die relevanten Informationen in den Textdaten bestimmt und entnommen. Dabei hilft ein konzipiertes Analyseraster beim Erkennen der entscheidenden Informationen. Mithilfe dieses Rasters können Informationen kategorisiert werden. Entscheidend ist allerdings, dass bereits zu Beginn ein Raster entworfen wird, das während der Analyse ergänzt und erweitert werden kann.



Anschliessen erfolgen eine Aufbereitung der Daten und eine Konsolidierung von Informationen aus verschiedenen Quellen (Gläser & Laudel, 2010, S. 43 ff.; S. 197 ff.)

3.3.2 Konzeption des Analyserasters

Das Analyseraster besteht aus drei Teilen: den Phasen der Lebenszyklusanalyse, den Kostenkategorien der TCO-Berechnungen und den weiteren Kriterien der endgültigen Bewertung.

Die Phasen des Lebenszyklusanalyse zur Gegenüberstellung der unterschiedlichen Antriebsformen von Nutzfahrzeugen im SGV sind die Herstellung, Antriebsenergieerzeugung, Nutzung, sowie die Entsorgung und die Infrastruktur. Die TCO berechnen sich aus den Fahrzeugkosten, den Treibstoffkosten, der Instandhaltung und der Maut. Die zusätzlichen Dimensionen sind die Reichweite, die Nutzlast und die Umsetzbarkeit.

Dieses Analyseraster wird für die Massnahmen der Subkategorie neue Fahrzeuge (alternative Antriebe) angewandt. Für die weiteren Massnahmen zur CO₂-Reduktion gelten die Unterpunkte des Steckbriefs als Analyseraster. Dazu gehören die Definition, die Funktionsbeschreibung, die Marktreife, der Verbreitungsgrad, die SWOT Analyse, die Anbieter, die Pilotprojekte und die Kostenaspekte.

3.4 Lebenszyklusanalyse

Für die Massnahmen in der Subkategorie «neue Fahrzeuge» wird jeweils eine Lebenszyklusanalyse durchgeführt. Die Lebenszyklusanalyse ist eine verbreitete Methode mit dem Ziel, eine umfassende Betrachtung aller durch die jeweilig betrachtete Technologie erzeugten Emissionen über definierte Lebensphasen (cradle to grave) abzubilden (siehe Abbildung 3). Für eine umfassende und vergleichbare Bewertung verschiedener Antriebstechnologien müssen auch indirekte, sowie vor- und nachgelagerte Emissionen entlang der Wertschöpfungskette berücksichtigt werden (Bothe, Steinfurt, 2020, S10).

Zu der reinen Nutzung des Fahrzeugs (Tank-to-Wheel) kommen die Phasen Fahrzeugherstellung (Cradle-to-Gate), Infrastruktur, Antriebsenergieerzeugung und End of Life hinzu. Zur Phase der Infrastruktur zählen sowohl Emissionen, welche bei einer Schaffung neuer Infrastrukturen (Neubau) als auch bei dem Gebrauch von Tankstellen und Ladestationen entstehen, dazu. Emissionen in der letzten Phase des Lebenszyklus (End-of-Life) entstehen hauptsächlich bei der Verwertung und können durch Recycling verringert werden (Bothe, Steinfurt, 2020, S11).

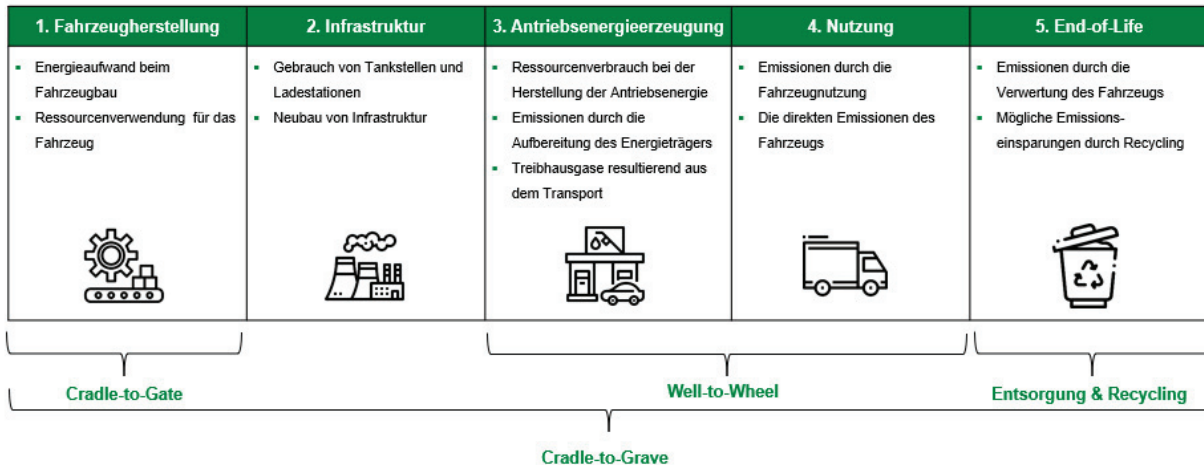


Abbildung 3: Die fünf Phasen einer Lebenszyklusanalyse (eigene Darstellung)

3.5 Total Cost of Ownership-Berechnungen

Total Cost of Ownership (TCO) sind definiert als die Methode zur Identifizierung der Gesamtkosten eines Systems über den gesamten Lebenszyklus (Dobschütz, Barth, Jäger-Goy, Kütz & Möller, 2000, S.453). Im Kern zielt das Konzept darauf ab, Beschaffungsentscheide nicht nur auf Grundlage des Kaufpreises eines Beschaffungsguts zu treffen, sondern sämtliche Kosten einzubeziehen, die im Zusammenhang mit dem Erwerb eines Guts stehen (Bremen, 2010, S.9).

Die Ursprünge des TCO-Konzepts sind in den 20er Jahren zu suchen. Bereits 1927 wurden Kosten, die über den Einkaufspreis hinausgehen und im Zusammenhang mit dem Einkauf und der Lieferantenauswahl stehen, betrachtet. Der eigentliche Ursprung des TCO-Modells wird dem US Department of Defence zugeordnet. Die Ursache hierfür waren steigende Betriebskosten des Inventars aufgrund stetig wachsender Personal- und Energiekosten. Dieser anhaltende Kostenanstieg bewegte die staatlichen Einkäufer dazu, die Gesamtkosten einer Investition detailliert zu betrachten und die Ursachen für den Anstieg zu identifizieren. Der Begriff «Total Cost of Ownership» wurde Mitte der 1980er von der Gartner Group etabliert, welche mittels der TCO-Analyse feststellte, dass in der Praxis fast ausschliesslich nur der finanzielle Anschaffungsaufwand berücksichtigt wird, da die anfallenden Kosten während des laufenden Betriebs zu intransparent sind (Lattermann, 2016, S.34).

4 Forschungsdesign: Vorgehen und Umfang

Nachdem in Kapitel drei die Methodologie vorgestellt wurde, wird in Kapitel 4 präsentiert, wie die beschriebenen Methoden in der Studie angewandt und für die Untersuchungen im wissenschaftlichen Rahmen adaptiert werden. Dafür wird zuerst das aus der

Literaturrecherche erarbeitete Cluster beschrieben. Des Weiteren werden die berücksichtigten Antriebstechnologien und die zugrundeliegende Argumentation präsentiert. Auch die betrachteten Fahrzeugklassen werden charakterisiert, bevor die Lebenszyklusanalyse und die TCO-Berechnungen zur Anwendung kommen. Somit beantwortet das vierte Kapitel die Frage nach dem Vorgehen und dem gewählten Umfang der Studie.

4.1 Cluster

Das Cluster der Massnahmen wurde auf Basis der umfangreichen Literaturrecherche entwickelt und in einem Workshop durch die Konsortialpartner validiert. Es kann in vier Kategorien aufgeteilt werden: Logistikprozesse, Fuhrparkmanagement, Infrastruktur und Transportmanagement. Teilweise existieren mehrere Subkategorien pro Kategorie. So gehören beispielsweise Softwaretechnologien wie Routenoptimierung, aber auch Fahrzeuglenkung zum Transportmanagement.

Insgesamt beinhaltet das Cluster eine Anzahl von 26 Massnahmen. Zu jeder Massnahme wird ein Steckbrief erstellt, der im Anhang enthalten ist. Für die Subkategorie «neue Fahrzeuge» werden umfangreichere Analysen durchgeführt, die eine CO₂- und TCO- Berechnung beinhalten. Dies wird im Folgenden genauer erläutert.

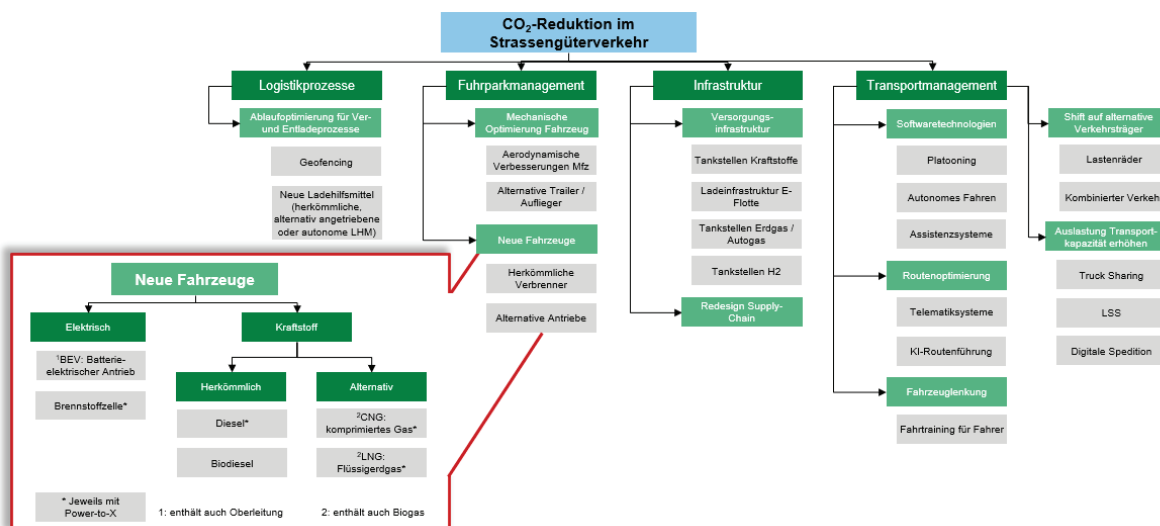


Abbildung 4: Cluster der Massnahmen (eigenes Modell)

4.2 Antriebstechnologien

Unter den zu vergleichenden Antriebstechnologien ist der Diesel der in dieser Studie verwendetet Referenzantrieb, weil 94% der deutschen Lkw und Zugmaschinen Diesel als Kraftstoff verwenden (KBA, 2019, S. 8) und damit die mit Abstand am meisten genutzte Antriebstechnologie ist.



Daneben sind im Strassengüterverkehr bei Lkw aktuell auch Benzin, Compressed Natural Gas (CNG), Liquified Natural Gas (LNG) und Battery Electric Vehicle (BEV) (insgesamt ca. 6% der Lkw in Deutschland) vertreten. Da es sich bei Benzin um eine Antriebstechnologie handelt, die höhere CO₂-Emissionen verursacht als Diesel (BDI, 2018), wird es in dieser Studie nicht weiter untersucht. Nicht aufgelistet in obiger Statistik, aber dennoch in dieser Studie untersuchte Antriebstechnologien sind Biodiesel, Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV) und synthetische Kraftstoffe. Biodiesel als ausgereifte und bereits erprobte Technologie bietet insbesondere die Möglichkeit, kurzfristig grosse Emissionseinsparungen zu generieren. FCEV und synthetische Kraftstoffe werden ebenfalls in dieser Studie betrachtet, da es sich hier um Technologien handelt, mit denen insbesondere zukünftig emissionsfreies Fahren möglich ist (thinkstep, prognos, 2017, S.7) (Randelhoff, 2020).

4.3 Zu vergleichende Fahrzeugklassen

In dieser Studie werden die Kosten und CO₂-Emissionen für verschiedene Gewichtsklassen von Nutzfahrzeugen verglichen. Es bietet sich eine Einteilung in die Gewichtsklassen N1 (bis 3.5t), N2 (zwischen 3.5t und 12t) und N3 (mehr als 12t) (Schweizerischer Bundesrat, 2013, S.4) an. Das maximal zulässige Gewicht von Lkw liegt mit Ausnahme des Kombinierten Verkehrs bei 40t (Bussgeldkatalog, 2020). Daher wurden den Konsortialpartner die folgenden zu untersuchenden Gewichtsklassen vorgeschlagen: 3.5t, 12t und 40t. In Rücksprache mit den Konsortialpartnern wurde vereinbart, den Fokus auf die beiden Extrembetrachtungen 3.5t und 40t zu legen.

4.4 TCO Kostenpunkte

Das Konzept der TCO-Rechnung ist an Wietschel (Wietschel et al., 2019) angelehnt, wo die Kostenkategorien Fahrzeugherstellungskosten, Treibstoffkosten und Reparaturkosten Berücksichtigung finden. Da in dieser Studie speziell der DACH-Raum (Deutschland, Österreich, Schweiz) betrachtet wird und betriebswirtschaftliche anstelle von volkswirtschaftlichen Kosten untersucht werden, werden zusätzlich die steuerlichen Abgaben bzw. Maut-Kosten für die Benutzung der Verkehrswege in den einzelnen Ländern berücksichtigt. Ausserdem werden die Treibstoffkosten der jeweiligen Länder einbezogen. Kaufprämien werden nicht in den Rechnungen berücksichtigt, weil diese situationsabhängig sehr unterschiedlich ausfallen. Ein Überblick über Kaufprämien und staatliche Förderungen gibt ein Exkurs in Kapitel 5.4.2.



4.5 Lebenszyklusanalyse

In dieser Studie werden die Lebenszyklusphasen Fahrzeugherstellung, Infrastruktur, Antriebsenergieerzeugung, Fahrzeugnutzung und Recycling unterschieden. Für die Lebenszyklusphasen Infrastruktur und Recycling wurden in der Desk Research in der wissenschaftlichen Literatur keine belastbaren Werte für einen Grossteil der alternativen Antriebstechnologien gefunden. Abschätzungen und ungenaue Annahmen können die Ergebnisse der gesamten Lebenszyklusanalyse stark verzerren. Deswegen werden diese Phasen in den folgenden Berechnungen dieser Studie nicht quantitativ berücksichtigt. Aufwände wie beispielsweise benötigte infrastrukturelle Ausbauten werden allerdings qualitativ aufgearbeitet und detailliert für die einzelnen Massnahmen dargelegt. Die Lebenszyklusphase des Recyclings ist darüber hinaus insofern schwierig zu bewerten, als dass Nutzfahrzeuge nach einer durchschnittlichen Einsatzdauer von ca. 3-5 Jahren (laut Angaben der Konsortialpartner aus Deutschland) nicht verschrottet oder recycelt, sondern in andere Länder weiterverkauft werden. Die Emissionsbetrachtungen dieser Studie fokussieren sich allerdings ausschliesslich auf den DACH-Raum.

5 CO₂-und TCO-Analyse für alternative Antriebe

In diesem Kapitel werden die erstellten Rechenkonzepte für die CO₂-Lebenszyklusanalyse und die TCO-Rechnung erläutert. In die Berechnungen fliessen auch Werte ein, die in den Interviews genannt wurden. Nach der Erläuterung des Rechenkonzepts für die CO₂-Lebenszyklusanalyse bzw. die TCO werden die Ergebnisse der Analysen vorgestellt.

5.1 Lebenszyklusanalyse für CO₂-Werte

5.1.1 Diesel als Vergleichstechnologie

Die Höhe der CO₂-Emissionen in der Fahrzeugherstellung liegt bei 8kg CO₂ pro Kilogramm Fahrzeuggewicht (Lei, Caixia und Yina, 2018). Die Formel für die CO₂-Emissionen bei der Fahrzeugherstellung eines Dieselfahrzeugs $C_{f,Diesel}$ ist also:

$$C_{f,Diesel} = G_{leer} * c_f$$

Dabei steht G_{leer} für das Leergewicht des Fahrzeugs und $c_f = 8 \frac{kgCO_2 eq}{kg}$.

Die Emissionen aus der Antriebsenergieerzeugung werden berechnet, indem der Verbrauch je 100km mit der Jahresfahrleistung und der Einsatzdauer in Jahren multipliziert wird:



$$C_{a,Diesel} = c_{a,Diesel} * \frac{V}{100} * D_J * L$$

V ist der Dieserverbrauch pro 100km, D_J ist die Jahresfahrleistung und L ist die Einsatzdauer. $c_{a,Diesel}$ sind die Vorketten-Emissionen von Diesel. Die CO₂-Emissionen aus Vorkette und Nutzung liegen bei 3.08 kg CO₂ pro Liter Diesel (Wietschel et al., 2019, S.7) Mit der Information, dass die CO₂-Emissionen aus der Nutzung bei 2.61 kg CO₂ pro Liter Diesel liegen (Bundesamt für Energie, 2020), lässt sich erschliessen, dass die CO₂-Emissionen aus der Antriebsenergieerzeugung bei 0.47kg CO₂ pro Liter Diesel liegen. Es gilt also: $c_{a,Diesel} = 0.47kg\ CO_2/l$.

Die Formel für die CO₂-Emissionen aus der Fahrzeugnutzung ist identisch mit der aus der Antriebsenergieerzeugung mit der Ausnahme, dass mit den spezifischen CO₂-Emissionen aus der Fahrzeugnutzung anstelle der Vorkettenemissionen multipliziert wird:

$$C_{n,Diesel} = c_{n,Diesel} * \frac{V}{100} * D_J * L$$

Es gilt: $c_{n,Diesel} = 2.61kg\ CO_2/l$.

5.1.2 CNG/LNG

Die CO₂-Emissionen aus der Fahrzeugherstellung werden analog wie bei Diesel berechnet. Die Vorkettenemissionen von CNG liegen bei 55 g CO₂/kWh, bei LNG betragen sie durch aufwendigere Produktionsschritte bei 78 g CO₂/kWh (Wietschel et al.,2019, S.8) Die Werte für die Vorkettenemissionen beziehen sich auf den durchschnittlichen Mix von Erdgas, welcher in der EU genutzt wird (European Commission DG Ener,2015, S.34-35).

Diesel ist in dieser Studie die Referenztechnologie. Um die CO₂-Emissionen der Antriebstechnologien zu vergleichen, wird bestimmt, wie hoch der Kraftstoffverbrauch einer alternativen Antriebstechnologie im Vergleich zu Diesel mit einer ansonsten identischen Fahrzeugkonfiguration ist. Dafür wird ein Rechenkonzept entwickelt. Das Rechenkonzept ist an Sternberg, Hand und Hebling (Sternberg, Hank und Hebling, 2019, S.2) angelehnt. Diese bestimmen den Energieverbrauch eines BEV in Bezug auf ein FCEV, indem der Energiegehalt von Wasserstoff unter Berücksichtigung des Wirkungsgrads einer Brennstoffzelle in einen Strombedarf umgerechnet wird. Dieses Konzept wird übernommen, nur werden die Verbräuche der alternativen Antriebstechnologien in dieser Studie ausgehend von einem Dieserverbrauch berechnet. Dazu wird der aus den Interviews erfragte Dieserverbrauch pro 100km in einen Energieverbrauch umgerechnet. Der Umrechnungsfaktor

ist die Energiedichte von Diesel, die bei 9.91kWh/Liter liegt (Bundesamt für Energie, 2018, S.18). Zusätzlich zur Energiedichte muss der Wirkungsgrad berücksichtigt werden, um den Anteil der Energie zu bestimmen, der tatsächlich in die Fortbewegung des Fahrzeugs einfließt. Der Wirkungsgrad eines Dieselmotors liegt zwischen 35 und 45% (Schmied, Wüthrich, Zah, Althaus und Friedl 2015, S.22) In derselben Studie wird auch ein Wirkungsgrad von 85-90% für Elektromotoren angegeben. Eine umfassendere Analyse des Wirkungsgrads von BEV inklusive Lade- und Getriebeverlusten ergibt hingegen einen Wirkungsgrad von 72% (vgl. Kapitel 5.2.3.). Der recherchierte Wert für den Wirkungsgrad von Dieselmotoren hinsichtlich des Wirkungsgrades des gesamten Dieselfahrzeugs erscheint sehr hoch. Aus diesem Grund wird in dieser Studie mit 35% die untere Grenze des Intervalls für den Wirkungsgrad des Dieselmotors als Wirkungsgrad des gesamten Dieselfahrzeugs angenommen.

Nach obigen Überlegungen wird der antriebstechnologieunabhängige Energieverbrauch mit folgender Formel berechnet:

$$E = \frac{V}{100} * D_J * L * e_D * \eta_{Diesel}$$

Dabei ist E der technologieunabhängige Nettoenergieverbrauch und $\eta_{Diesel} = 35\%$ der Wirkungsgrad des Dieselfahrzeugs.

Für die Berechnung des Bruttoenergieverbrauchs einer alternativen Antriebstechnologie wird der technologieunabhängige Nettoenergieverbrauch durch den Wirkungsgrad der alternativen Antriebstechnologie geteilt. Die Emissionen aus der Antriebsenergieerzeugung werden berechnet, indem der Bruttoenergieverbrauch mit den CO₂-Emissionen pro kWh multipliziert werden, die als Vorketten-Emissionen entstehen. Die Formel für die CO₂-Emissionen aus der Antriebsenergieerzeugung $C_{a,CNG/LNG}$ ist also:

$$C_{a,CNG/LNG} = \frac{c_{a,CNG/LNG} * E}{\eta_{CNG/LNG}}$$

$c_{a,CNG/LNG}$ sind die CO₂-Emissionen pro kWh aus der Antriebsenergieerzeugung. $c_{a,CNG} = 55g\ CO_2/kWh$ und $c_{a,LNG} = 78g\ CO_2/kWh$. $\eta_{CNG/LNG}$ ist der Wirkungsgrad von Gasmotoren. Für den Wirkungsgrad von Gasmotoren wurden keine genauen Angaben gefunden, dafür allerdings die Aussage, dass der Wirkungsgrad von Gasmotoren, denen von Dieselmotoren ähnelt (Zhao, Burke, Zhu, 2013, S.4). Deswegen wurde für Gasfahrzeuge in dieser Studie ebenfalls ein Wirkungsgrad von 35% angenommen.



Um die CO₂-Emissionen aus der Fahrzeugnutzung zu berechnen, wird der Bruttoenergieverbrauch mit den CO₂-Emissionen pro kWh, die aus der Fahrzeugnutzung entstehen, multipliziert. Die gefundenen Werte bewegen sich im Spektrum 198-206g CO₂/kWh (Bünger, Landinger, Weindorf, Wurster, Zerhusen & Zittel, 2016, S.60). In dieser Studie wird daher mit einem Mittelwert von 202g CO₂/kWh gerechnet.

5.1.3 BEV

Bei der Fahrzeugherstellung eines BEV entstehen zusätzliche Emissionen durch die Batterieherstellung. Angelehnt an Lei, Caixia & Yina, (2018) werden die CO₂-Emissionen durch die Fahrzeugherstellung als Summe der Emissionen aus Fahrzeuggestell und Batterie ermittelt. Die CO₂-Emissionen durch das Fahrzeuggestell ergeben sich analog zu Dieselfahrzeugen. Die CO₂-Emissionen durch die Batterieherstellung werden berechnet, indem die Kapazität der Batterie mit den CO₂-Emissionen multipliziert werden, die pro kWh Speicherkapazität der Batterie entstehen:

$$C_f = G_{\text{leer}} * c_f + K_B * c_B$$

K_B ist die Speicherkapazität der Batterie in kWh, c_B sind die CO₂-Emissionen pro kWh Speicherkapazität einer Batterie. Für c_B wurden in der wissenschaftlichen Literatur stark schwankende Werte gefunden. Hall und Latsey (Hall und Latsey, 2018, S.3) fassen Ergebnisse aus Studien zusammen, in denen Werte von 30-494 kg CO₂/kWh für c_B genannt werden. Schneider (Schneider, 2014, S.17) deklariert und verwendet CO₂-Emissionen, die zwischen 53-139 kg CO₂/kWh liegen und rechnet mit einem Mittelwert von 100 kg CO₂/kWh. In dieser Studie wird ebenfalls der Mittelwert nach Schneider von 100 kg CO₂/kWh für die weiteren Berechnungen verwendet.

Die Formel für die CO₂-Emissionen der Lebenszyklusphase Fahrzeugherstellung eines BEV lautet also:

$$C_f = G_{\text{leer}} * c_f + K_B * c_B$$

Für eine konkrete Berechnung fehlt noch ein Wert für die Kapazität der Batterie. Diese wird mithilfe der Reichweite des BEV bestimmt. Die Reichweite wird aus zum Zeitpunkt der Studienerstellung aktuellen wissenschaftliche Pilotprojekten im Bereich BEV-Nutzfahrzeuge entnommen. Diese wurden in den Interviews mit den Konsortialpartnern validiert. In Kombination mit dem Kraftstoffverbrauch lässt sich der Energieverbrauch über die Reichweite bestimmen. Dieser Energieverbrauch wird der Batteriekapazität gleichgesetzt. Die Formel ist also nahezu identisch zu dem Energieverbrauch über die Einsatzdauer mit dem



Unterschied, dass statt der Fahrleistung über die Einsatzdauer die geforderte Reichweite verwendet wird:

$$K_B = \frac{V}{100} * D_{proFahrt} * e_D * \frac{\eta_{Diesel}}{\eta_{BEV}}$$

Batterien haben eine begrenzte Lebensdauer. So ergab ein Versuch, dass eine Batterie nach 800 Ladevorgängen nur noch 80% ihrer ursprünglichen Kapazität hat (Tomaszewska et al., 2019, S.16). Hier ist anzumerken, dass diese Messungen unter extremen Bedingungen durchgeführt wurden (unregelmässiges Aufladen unter hohen Leistungen, Kälte etc.). Die Abschätzung von 800 Ladezyklen für die Lebensdauer einer Batterie für ein BEV ist durch diese Umstände als konservativ einzustufen. Eine geeignetere Annahme für die Anzahl an Ladezyklen einer Batterie ist ein Wert von 3000 (Gnann et al., 2017, S.57). In den Interviews wurden auch die praktischen Erfahrungen aus Pilotprojekten der Konsortialpartner erfragt, welche die Annahme von 3000 Ladezyklen und die damit deutlich grössere Lebensdauer von Batterien bestätigt haben.

Für die Emissionen aus der Antriebsenergieerzeugung wurden die aktuellen Strommixe der Länder des DACH-Raums verwendet. Die CO₂-Emissionen werden berechnet, indem der Bruttoenergieverbrauch des BEV mit den spezifischen CO₂-Emissionen pro kWh multipliziert wird. Zusätzlich zu den Strommischen werden in dieser Studie auch Fälle untersucht, in denen Ökostrom verwendet wird. Die spezifischen CO₂-Emissionen pro kWh liegen hierfür bei 0.

Für die CO₂-Emissionen, die pro erzeugter kWh Strom in einem Land entstehen, werden unterschiedliche Angaben gefunden. Dies liegt u.a. daran, dass zum einen der Produktionsstrommix angegeben wird, zum anderen teilweise der Konsumentenstrommix. So liegen für das Jahr 2019 z.B. die CO₂-Emissionen des in Deutschland produzierten Stroms bei 401g CO₂ pro kWh, die CO₂-Emissionen für den in Deutschland konsumierten Strom liegen hingegen bei 427g CO₂/kWh (Umweltbundesamt, 2019, S.9). In Österreich liegt der Wert für die CO₂-Emissionen des produzierten Stroms laut Angaben des Umweltbundesamts bei 130 g CO₂/kWh. Werden die Stromimporte berücksichtigt, so wird ein Wert von 280g CO₂/kWh angegeben. Je nach Berechnungsart werden sogar Werte genannt, die bei bis zu 800g CO₂/kWh liegen (Berücksichtigung der Verdrängung von Kraftwerksarten) (Artner, 2016). Letztgenanntes Beispiel für die CO₂-Emissionen wird in dieser Studie nicht näher untersucht, soll aber verdeutlichen, dass es sich bei den CO₂-Emissionen, die bei der Herstellung von einer kWh Strom entstehen, keineswegs um einfache eindeutige Zahlenwerte handelt. Die vier grössten Schweizer Stromproduzenten weisen CO₂-Emissionen bei der Stromerzeugung auf,



die zwischen 100 und 256g CO₂/kWh liegen. (Brunner, Iten, 2020, S. 15). Der Schweizer Lieferantenstrommix beträgt im Jahr 2014 149.4g CO₂/kWh, der Verbraucherstrommix 181.5g CO₂/kWh (Messmer, Frischknecht, 2016, S.5). Für die Schweiz werden aber auch Werte für den in die Schweiz gelieferten Strom mit CO₂-Emissionen von nur 14.4g CO₂/kWh angeführt (Frischknecht, Itten und Flury, 2012, S.12). Die hier recherchierten Werte sollten nur mit Vorsicht miteinander verglichen werden, u.a. weil sie sich auf verschiedene Jahre beziehen. Eine pauschale Aussage wie etwa, dass der österreichische Strom weniger CO₂-Emissionen als der Schweizer Strom verursache, sollte nicht getroffen werden. In dieser Studie wird für Deutschland ein Strommix mit CO₂-Emissionen von 400g/kWh angenommen, für die Schweiz 150g/kWh und für Österreich 130g/kWh.

Für die Berechnung der CO₂-Emissionen über den Energieverbrauch muss ausserdem der Wirkungsgrad eines BEV bekannt sein, um über den Antriebstechnologie-unabhängigen Nettoenergieverbrauch den Bruttoenergieverbrauch zu bestimmen. Der Wirkungsgrad beim Entladen einer Batterie liegt bei 90%, der Wirkungsgrad eines Elektromotors liegt bei 85% und der Wirkungsgrad der Mechanik liegt bei 95% (Belmer et al., 2019, S.28). Damit ergibt sich für den BEV ein gesamter Wirkungsgrad von 72.675%. Die Formel für die CO₂-Emissionen aus der Antriebsenergieerzeugung nach obigen Überlegungen ist also:

$$C_a = \frac{E * c_{strommix}}{\eta_{BEV}}$$

In der Nutzungsphase verursachen BEV keine CO₂-Emissionen, deswegen sind für diese Phase bei BEV auch keine Berechnungen notwendig.

Neben den CO₂-Emissionen wird für BEV auch das Batteriegewicht bestimmt, um die Höhe der Nutzlastverluste und damit die Höhe an CO₂-Emissionen pro zurückgelegter Strecke und Nutzlast zu bestimmen. Das Batteriegewicht M_B wird berechnet, indem die Kapazität der Batterie K_B durch die Energiedichte einer Batterie d_B geteilt wird:

$$M_B = \frac{K_B}{d_B}$$

Für die Energiedichte einer Batterie werden in der Literatur unterschiedliche Werte angegeben. Während bestimmte Zellenarten eine Energiedichte von 140-180Wh/kg erreichen, gibt es heute auch bereits Zellen, die eine Energiedichte von bis zu 270Wh/kg erreichen können und zukünftig gegebenenfalls 300Wh/kg erreichen werden. Mit grösseren Zellentypen wird sogar eine Energiedichte von 350Wh/kg erwartet (Thielmann et al., 2020, S.28). In



dieser Studie wird mit einer Energiedichte von 270Wh/kg gerechnet, weil dies die aktuell höchst realisierbare Energiedichte darstellt.

5.1.4 FCEV

Für FCEV kann in der wissenschaftlichen Literatur kein Ansatz gefunden werden, die CO₂-Emissionen durch die Fahrzeugherstellung zu berechnen. Die CO₂-Emissionen für FCEV werden daher analog zu den CO₂-Emissionen bei der Herstellung von Diesel- und Gasfahrzeugen angenommen mit dem einzigen Unterschied, dass die spezifischen CO₂-Emissionen bei der Fahrzeugherstellung pro kg Fahrzeuggewicht c_f einen für FCEV eigenen Wert annehmen soll und nicht denselben wie bei Diesel- und Gasfahrzeugen. Speziell für Lkw liegen jedoch keine Werte vor, die eine Berechnung der CO₂-Emissionen ermöglichen. Deswegen muss in diesem Fall auf Studien zurückgegriffen werden, welche die CO₂-Emissionen bei der Fahrzeugstellung von Brennstoffzellen-Pkw untersucht haben. Sternberg, Hank und Hebling (Sternberg, Hank und Hebling, 2019a, S.8) nehmen CO₂-Emissionen von 0.11kg/km an. Die gesamte Fahrleistung des Pkw liegt bei 150'000km, woraus sich schließen lässt, dass die CO₂-Emissionen aus der Fahrzeugherstellung bei 16'500kg CO₂ für den Pkw liegen. Das Fahrzeug, für das diese CO₂-Emissionen berechnet wurden, hat ein Gewicht von 1919kg. Teilt man die CO₂-Emissionen aus der Fahrzeugherstellung durch das Fahrzeuggewicht, so kommt man auf 8.598≈8.6 kg CO₂/kg. Es wird in dieser Studie also mit spezifischen CO₂-Emissionen durch die Fahrzeugherstellung von $c_f = 8.6 \text{ kg } \frac{\text{CO}_2}{\text{kg}}$ gerechnet.

Für die CO₂-Emissionen aus der Antriebsenergieerzeugung wird angenommen, dass der Wasserstoff per Elektrolyse mit dem Strommix eines der Länder aus dem DACH-Raum hergestellt wird. Es wird also nicht die Umweltbilanz von aus dem Ausland importiertem Wasserstoff untersucht. Die Untersuchung von Wasserstoff aus Elektrolyse ist interessant, weil es auch das klimaneutrale Herstellungsszenario von Wasserstoff aus Ökostrom beinhaltet. Bei der Herstellung von Wasserstoff durch Elektrolyse geht Energie verloren. Dies zeigt sich bei den CO₂-Emissionen pro kWh Wasserstoff: Wird ein Strommix von CO₂-Emissionen von 474g CO₂/kWh verwendet, liegen die CO₂-Emissionen des hergestellten Wasserstoffs bei 691g CO₂/kWh (Greenpeace, 2020, S.9). Pro kWh sind die CO₂-Emissionen des Wasserstoffs also um den Faktor 1.45 höher als der Strom, mit dem der Wasserstoff hergestellt wurde. Im Folgenden wird angenommen, dass der Zusammenhang zwischen den CO₂-Emissionen aus dem Strommix und den CO₂-Emissionen, die in die Herstellung von einer kWh Wasserstoff einfließen, proportional sind. Die CO₂-Emissionen aus der Antriebsenergieerzeugung für FCEV werden berechnet, indem der Bruttoenergiebedarf von



FCEV mit dem der spezifischen CO₂-Emissionen pro kWh eines Strommix und dem Umrechnungsfaktor $u_{fH2} = 1.45$ multipliziert wird:

$$C_a = E * c_{strommix} * \frac{u_{fH2}}{\eta_{H2}}$$

Der Wirkungsgrad von FCEV wird berechnet, indem Wirkungsgrad von Brennstoffzelle, Elektromotor und Mechanik miteinander multipliziert werden. Diese liegen bei 60%, 85% und 95% (Belmer et al., 2019, S.28), womit sich ein Gesamtwirkungsgrad des FCEV von 48.45% ergibt.

Analog zu BEV verursachen FCEV in der Nutzungsphase keine CO₂-Emissionen, deswegen ist für diese Lebenszyklusphase keine Berechnung notwendig.

5.1.5 Biodiesel und synthetische Kraftstoffe

In dieser Studie wird nur Biodiesel aus Abfällen untersucht. Biodiesel, der aus Raps oder Palmöl hergestellt wird, wird nicht berücksichtigt, weil dessen CO₂-Einsparungen gegenüber Diesel u.U. bei gerade einmal 5% liegen (Lichtblau, Pölz, Stix, Winter, 2012, S.8). Hinzu kommt, dass Biodiesel aus Raps und Palmöl beim Anbau in Konkurrenz zu Lebensmitteln steht (Greenpeace, 2014).

Biodiesel aus Altspeiseöl verursacht kombiniert über Antriebsenergieerzeugung und Nutzung CO₂-Emissionen von 336g CO₂/Liter (Biofuels Schweiz, 2013, S.12). Für die Berechnung der CO₂-Emissionen wird dieselbe Formel wie bei Diesel angewendet. Die Berechnung der CO₂-Emissionen durch Antriebsenergieerzeugung und Fahrzeugnutzung ist ausserdem nahezu identisch zu Diesel mit der Ausnahme, dass ein Vorfaktor $c_{a/n}$ für Antriebsenergieerzeugung und Fahrzeugnutzung verwendet wird. Es wird damit berücksichtigt, dass der Energiegehalt von Biodiesel geringer als der von klassischem Diesel ist: Um einen Energiegehalt von 1GJ zu erhalten, sind 31l Biodiesel oder 28l Diesel notwendig (Berger, Pfister, Bach & Finkbeiner, 2015, S.6666). Der Energiegehalt von 1l Biodiesel entspricht also dem Energiegehalt von 0.903l von Diesel, der Verbrauch an Biodiesel ist also etwa 110% des Verbrauchs an herkömmlichem Diesel. Die CO₂-Emissionen durch Antriebsenergieerzeugung werden daher zusätzlich um den Faktor 1.1 multipliziert, um den höheren Verbrauch zu berücksichtigen.

Für synthetische Kraftstoffe wird keine detaillierte Rechnung wie bei den anderen Antriebstechnologien durchgeführt. Grund hierfür ist, dass synthetische Kraftstoffe noch nicht weit entwickelt sind. Ausserdem ergeben Rechnungen für die CO₂-Emissionen von

synthetischen Kraftstoffen unter Verwendung eines nicht emissionsfreien Strommix sehr hohe Werte. Die Idee hinter synthetischen Kraftstoffen ist allerdings, diese mithilfe erneuerbarer Energien herzustellen. Deshalb werden synthetische Kraftstoffe mit den anderen Antriebstechnologien verglichen, die das Potenzial zur Klimaneutralität in Antriebsenergieerzeugung und Fahrzeugnutzung haben, indem die Wirkungsgrade über die gesamte Herstellungskette von der erneuerbaren Energie bis hin zu dem Anteil der Energie, der in die Fortbewegung umgesetzt wird, verglichen werden.

5.1.6 Vergleich der Antriebstechnologien

In diesem Kapitel werden die erarbeiteten Rechenkonzepte auf die spezifischen Fahrzeugkonfigurationen, gestützt auf eine Validierung durch die Interviews mit den Konsortialpartnern der Studie, angewendet und miteinander verglichen.

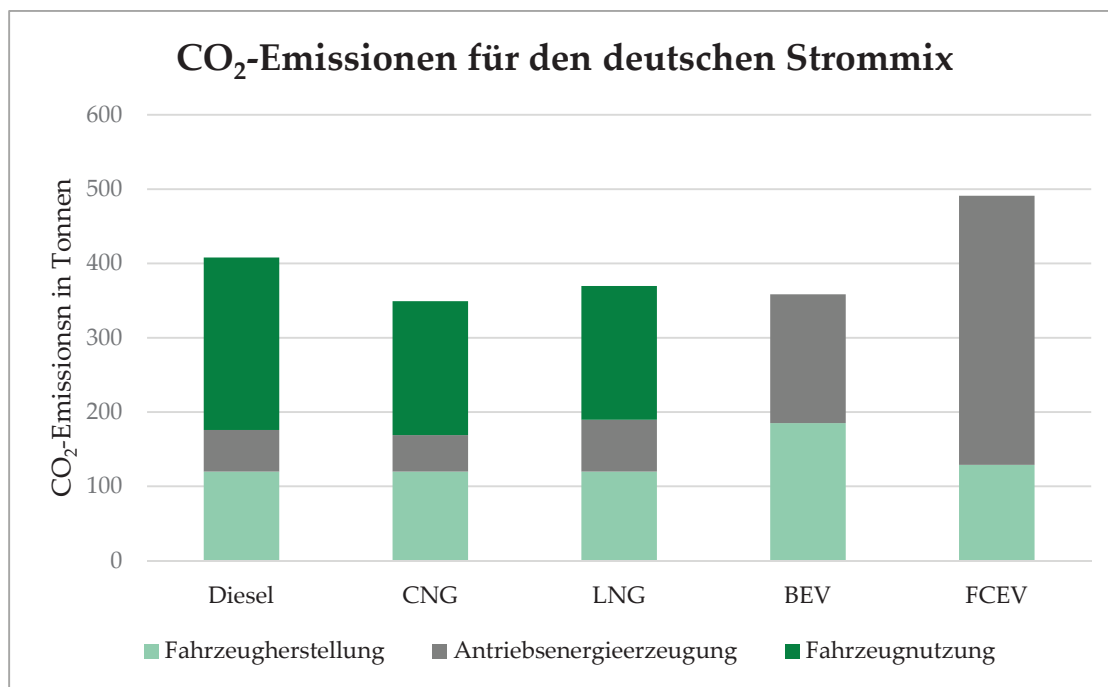


Abbildung 5: CO₂-Emissionen der Antriebstechnologien mit deutschem Strommix (eigene Darstellung)

Das Diagramm zeigt die CO₂-Emissionen, welche die Antriebstechnologien Diesel, CNG, LNG, BEV und FCEV über ihren gesamten Lebenszyklus und in den einzelnen Lebensphasen ausstossen. Die Grundannahmen sind: Dieserverbrauch von 30l/100km, 15t Leergewicht, 25t Nutzlast, Jahresfahrleistung von 100'000km, 3 Jahre Einsatzdauer, Reichweite von 450km, deutscher Strommix (ungefähr 400g CO₂/kWh).

Es fällt auf, dass mit alternativen Antriebstechnologien nur geringfügig CO₂-Emissionen eingespart werden können. CNG und LNG sparen in der Antriebsenergieerzeugung und Fahrzeugnutzung kombiniert jeweils geringfügig CO₂-Emissionen im Vergleich zum Diesel



ein. Die CO₂-Einsparungen für BEV sind für die Betrachtung von Antriebsenergieerzeugung und Fahrzeugnutzung deutlich geringer als bei Diesel, jedoch wird ein grosser Teil dieser Einsparungen durch die CO₂-intensivere Fahrzeugherstellung kompensiert. Bei FCEV sind die CO₂-Emissionen unter Verwendung des deutschen Strommix sogar höher als die von Diesel. Dies ist insbesondere auf den geringen Wirkungsgrad von FCEV über die gesamte Produktionskette in Kombination mit einem relativ CO₂-intensiven Strommix zurückzuführen.

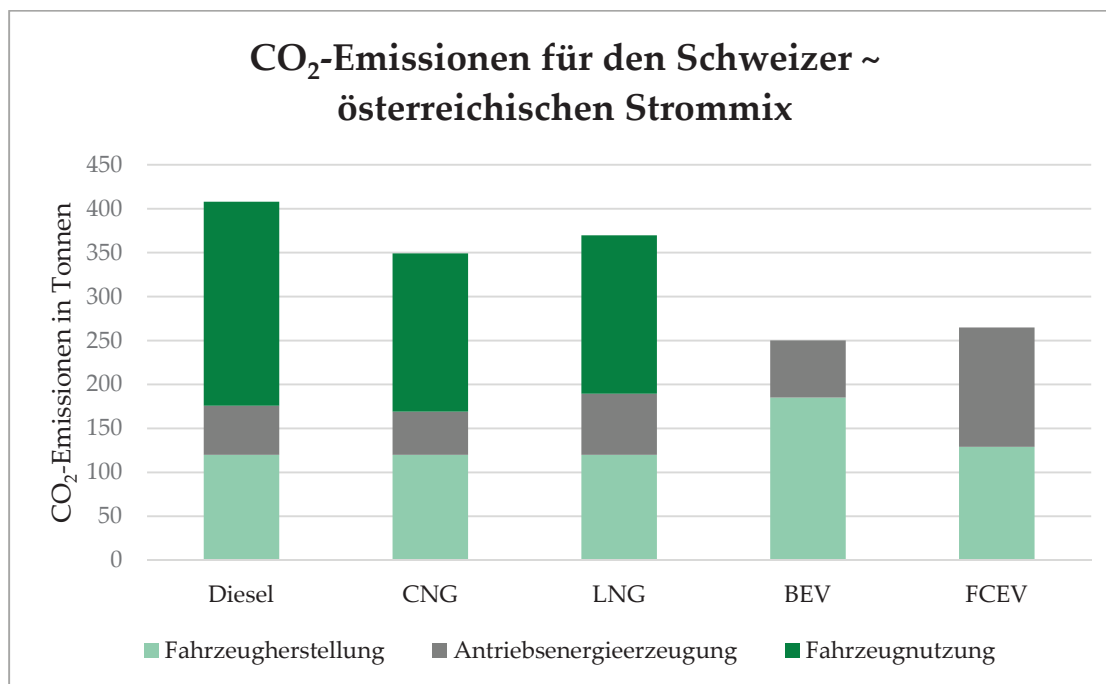


Abbildung 6: CO₂-Emissionen der Antriebstechnologien mit Schweizer Strommix (eigene Darstellung)

Das Diagramm zeigt die CO₂-Emissionen, welche die Antriebstechnologien über ihren gesamten Lebenszyklus und in den einzelnen Lebensphasen auf der Grundlage des aktuellen Schweizer Strommix emittieren. Die grundlegenden Annahmen sind identisch mit denen des vorherigen Diagramms mit der Ausnahme, dass ein Strommix mit CO₂-Emissionen von 150g CO₂/kWh angenommen wird. Dieser Emissionswert stellt neben dem aktuellen Schweizer Strommix auch den aktuellen österreichischen (130g CO₂/kWh) ausreichend genau dar. Deswegen werden für österreichischen und Schweizer Strom keine getrennten Analysen durchgeführt.

Da die CO₂-Emissionen von CNG und LNG unabhängig vom betrachteten Strommix sind, liegen für diese Antriebstechnologien keine Unterschiede zum deutschen Szenario vor. Bei BEV und FCEV fällt hingegen auf, dass beide eine deutlich bessere CO₂-Bilanz haben als Diesel, CNG und LNG. Bei BEV ist zu erkennen, dass der Grossteil der CO₂-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus in der Fahrzeugherstellung entsteht. Hier ist es wichtig zu



beachten, dass insbesondere hinsichtlich der CO₂-Emissionen pro Herstellung einer kWh Batterie stark schwankende Werte in der Literatur gefunden wurden und die Aussagekraft der CO₂-Emissionen für die Fahrzeugherstellung von BEV daher begrenzt ist. Daneben ist anzumerken, dass von einer Einsatzdauer von drei Jahren ausgegangen wird. Für längere Lebensdauern sinkt der Anteil der CO₂-Emissionen für die Fahrzeugherstellung an den gesamten CO₂-Emissionen über alle Lebenszyklusphasen. Bei FCEV sind die CO₂-Emissionen durch die Antriebsenergieerzeugung wegen der geringen Energieeffizienz in der Herstellung von Wasserstoff höher als bei BEV. Durch die geringeren CO₂-Emissionen in der Fahrzeugherstellung sind FCEV aber über alle Lebenszyklusphasen auf einem ähnlichen Niveau wie BEV.

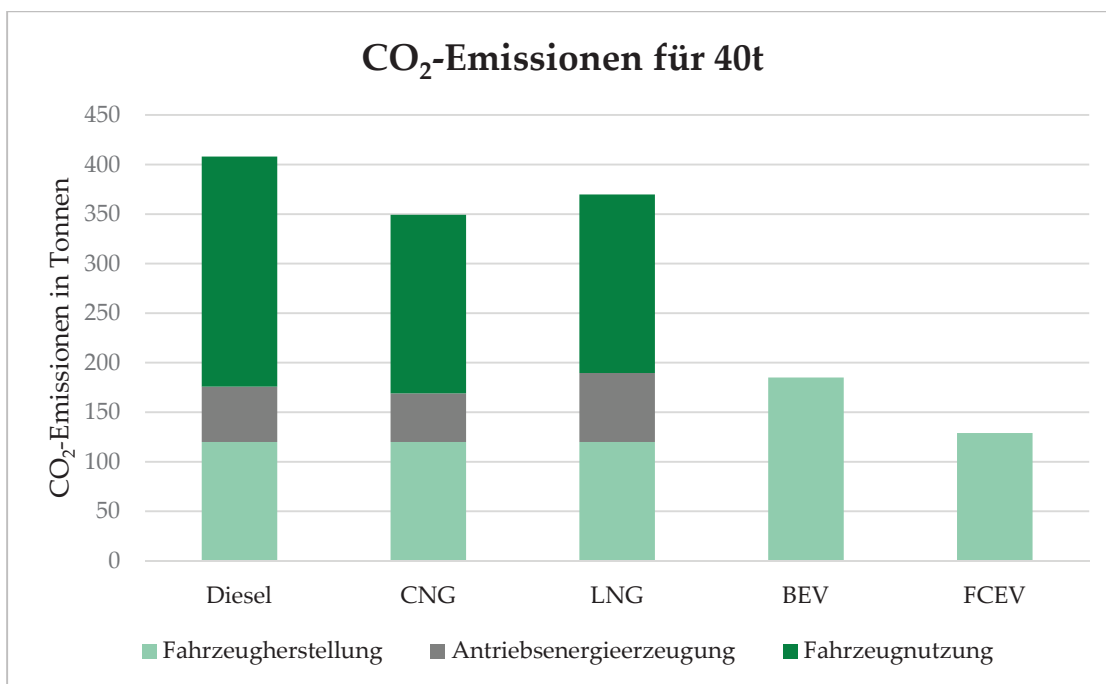


Abbildung 7: CO₂-Emissionen der Antriebstechnologien mit Strom aus erneuerbaren Energien (eigene Darstellung)

Das Diagramm zeigt stellt die CO₂-Emissionen der Antriebstechnologien unter Verwendung eines emissionsfreien Strommix dar (Szenario Ökostrom). Die Annahmen an die Fahrzeugkonfiguration sind identisch zu den vorangegangenen Szenarien. Es fällt auf, dass BEV und insbesondere FCEV noch einmal deutlich besser hinsichtlich der gesamten CO₂-Emissionen abschneiden als Diesel, CNG und LNG.



Exkurs: Ausblick erneuerbare Energien im DACH-Raum

Wie lange wird es dauern, bis erneuerbare Energien im DACH-Raum weit verbreitet sein werden? Um diese Frage zu beantworten, werden die klimapolitischen Ziele der drei Länder herangezogen: In Deutschland ist die Zielsetzung, bis 2050 einen Anteil von mindestens 80% an erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch zu erreichen (Memmler, Lauf & Schneider, 2018, S.15). Österreich hat sich das Ziel gesetzt, die Stromversorgung bis 2030 auf 100% erneuerbare Energien umzustellen (Regierungsprogramm 2020-2024, 2020, S.103). Das Ziel der Schweiz ist, bis 2050 klimaneutral zu sein (Bundesamt für Umwelt, 2018, S.15). Das formulierte Ziel bezieht sich also nicht nur auf die Stromproduktion, sondern die gesamten CO₂-Emissionen der Schweiz und ist damit deutlich ambitionierter einzustufen als der alleinige Umstieg auf 100% erneuerbare Energien.

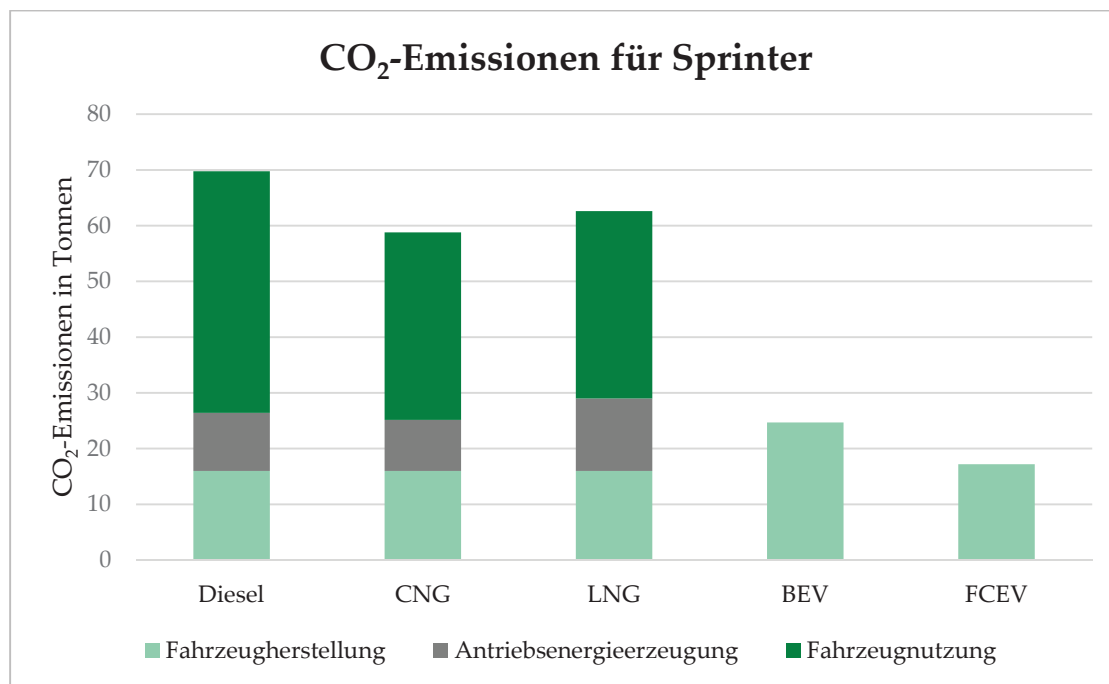


Abbildung 8: CO₂-Emissionen der Antriebstechnologien mit Strom aus erneuerbaren Energien für Sprinter (eigene Darstellung)

Das Diagramm stellt die CO₂-Emissionen von Nutzfahrzeugen einer Gewichtsklasse von 3,5t (Sprinter-Klasse) für verschiedene Antriebstechnologien über ihren gesamten Lebenszyklus gegenüber. Die grundlegenden Annahmen für dieses Szenario sind: Dieserverbrauch von 12l/100km, 2t Leergewicht, 1.5t Nutzlast, Jahresfahrleistung von 35'000km, Einsatzdauer von 4 Jahren, Reichweite von 150km, emissionsfrei produzierter Strom.

Mit dem Unterschied, dass die gesamten CO₂-Emissionen für Sprinter über alle Lebenszyklusphasen deutlich geringer sind als bei 40-Tonnern, sind die relativen Unterschiede der CO₂-Emissionen ansonsten sehr ähnlich.

Exkurs: Wirkungsgrade der Antriebstechnologien auf Basis von erneuerbaren Energien

Das aufgestellte Rechenkonzept für die Darstellung der CO₂-Emissionen der Antriebstechnologien berücksichtigt nicht den Wirkungsgrad von Antriebstechnologien, die ihren Strom aus erneuerbaren Quellen beziehen. Deswegen werden in folgender Grafik die Wirkungsgrade der Antriebstechnologien, Power-to-X, FCEV und BEV gegenübergestellt:

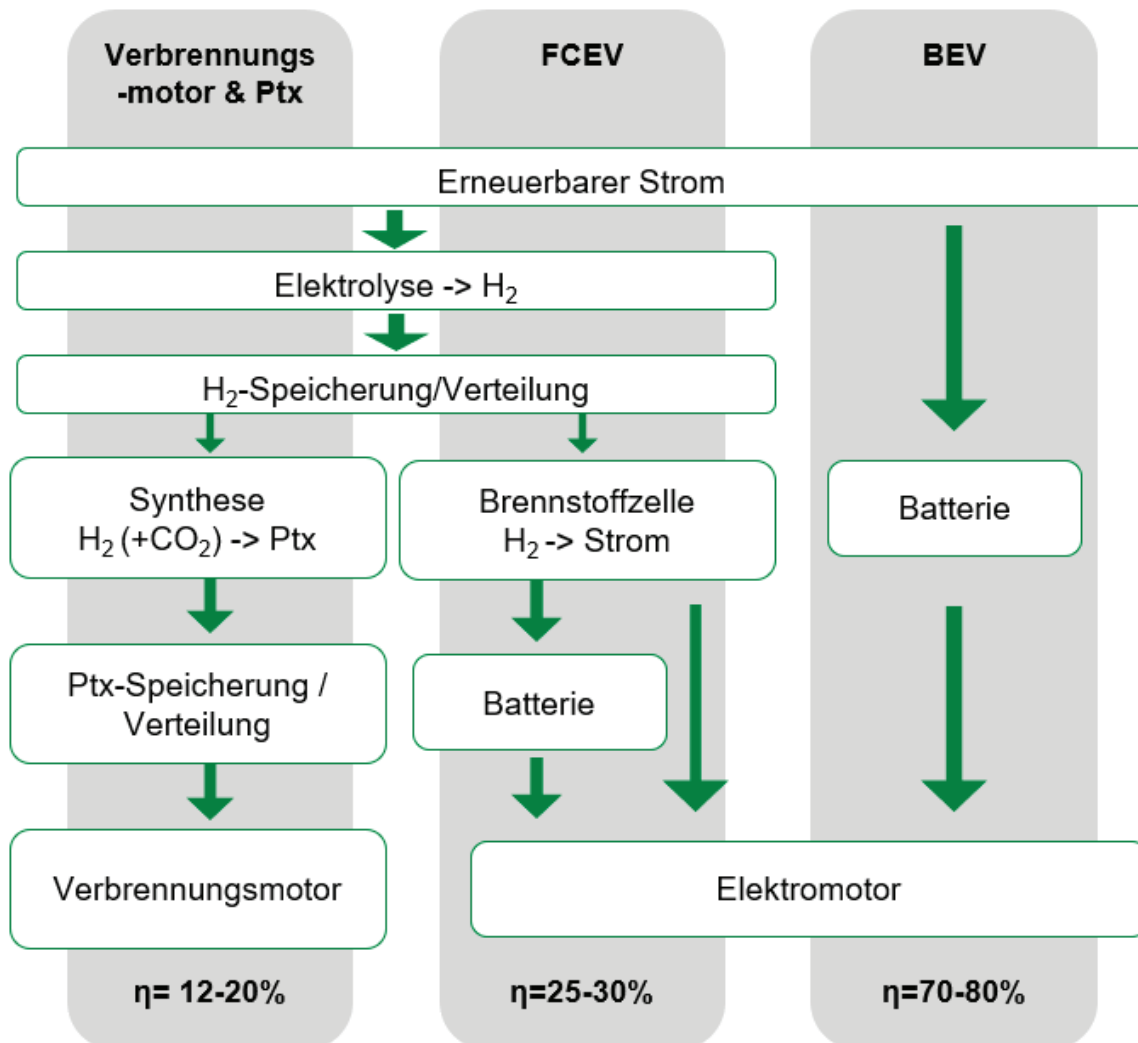


Abbildung 9: Wirkungsgrade der Antriebstechnologien (eigene Darstellung) angelehnt an Randelhoff (Randelhoff, 2020)

Hinsichtlich des Wirkungsgrads schneiden insbesondere FCEV und synthetische Kraftstoffe deutlich schlechter ab als BEV. In Hinblick auf den Wirkungsgrad ist es also naheliegend, wenn möglich, BEV einzusetzen und auf Wasserstoff oder synthetische Kraftstoffe zweitrangig umzusteigen. Dieses Argument entfällt allerdings, wenn der Wasserstoff bzw. synthetischen Kraftstoffe aus Strom-Überschüssen hergestellt werden. Wird der Strom aus erneuerbaren Energien erzeugt, sind Schwankungen zu erwarten. Ist für den Strom keine sofortige Nutzung möglich, erscheint es besser, diesen mit einem geringen Wirkungsgrad zu speichern als gar nicht zu nutzen (frontier economics, 2020, S.64).



5.2 Wirtschaftliche Betrachtung mittels TCO

Die TCO-Rechnung dieser Studie orientiert sich stark an der TCO-Rechnung von Wietschel et al. (Wietschel et al., 2019). Es werden bewusst einige Modifizierungen vorgenommen, die sich auf den DACH-Raum, den Fokusbereich dieser Studie, beziehen. Insbesondere finden in dieser Studie die Treibstoffpreise in Deutschland, Österreich und der Schweiz sowie die jeweiligen Gebühren für die Nutzung der Strassen (Maut, LSVA) Berücksichtigung.

5.2.1 Diesel als Vergleichstechnologie

Die Gesamtkosten für die Anschaffung eines Dieselfahrzeuges setzen sich aus Kosten des Fahrzeuggestells, des Dieseltanks und des Dieselmotors zusammen. Die Kosten für das Fahrzeuggestell fallen für alle Antriebstechnologien an. Diese liegen bei Fahrzeugen mit einem Maximalgewicht von 40t bei ca. 58'400€. Die Kosten für den Dieseltank werden fix mit 850€ bewertet. Die Kosten des Dieselmotors werden berechnet, indem die Leistung des Dieselmotors mit dem Preis pro kWh multipliziert wird. Dieser liegt bei 65.3€/kW (Wietschel et al., 2019, S.39). Die Formel für die dieselspezifischen Fahrzeugkosten setzt sich somit wie folgt zusammen:

$$K_{F,D} = k_{M,D} * P_M + K_{T,D}$$

Dabei sind $K_{F,M,D}$ die Anschaffungskosten für das Fahrzeug, $k_{M,D} = 65.3€/kW$ sind die Kosten pro kW Motorleistung. P_M ist die Leistung des Motors. Hierfür werden die Konfigurationen der Fahrzeuge aus den Interviews der Konsortialpartner verwendet.

Die Kosten für das Fahrzeuggestell eines Sprinters werden berechnet, indem vom durchschnittlichen Preis eines Sprinters die Kosten für Tank und Motor abgezogen werden. Die Kosten liegen bei ungefähr 46'000€ bei einer Motorenleistung von 170PS (Comparis, 2020), also ungefähr 120kW. Damit ergibt sich für die Kosten des Fahrzeuggestells eines Sprinters:

$$46'000€ - 850€ - \frac{65.3€}{kW} * 120kW = 37314€$$

Dieser Wert wird der Einfachheit halber zu 35'000€ abgerundet.

Die Treibstoffkosten werden berechnet, indem der Verbrauch pro 100km mit der in der Einsatzdauer zurückgelegten Strecke und dem Dieselpreis multipliziert werden:

$$P = \frac{V}{100km} * D_J * L * p_{Diesel}$$

Die Treibstoffkosten werden auf Wunsch der Konsortialpartner ohne Mehrwertsteuer berechnet. In Deutschland wird mit 0.948€/Liter gerechnet (ADAC, 2020), in Österreich (nach Abzug von 20% Mehrwertsteuer) mit 0.825€/Liter (ADAC, 2020a) und in der Schweiz (nach eigens ausgeführtem Abzug der Mehrwertsteuer von 8%) mit 1.18€/Liter (GlobalpetrolPrices.com, 2020).

Für die Reparaturkosten K_{Rep} wird bei Dieselfahrzeugen mit 0.146€/km gerechnet (Wietschel et al., 2019, S.40). Diese werden mit der über die Einsatzdauer zurückgelegten Strecke multipliziert:

$$K_{Rep} = k_{Rep} * D_J * L$$

In der Schweiz wird als Strassenbenutzungsgebühr die Leistungsabhängige Schwerverkehrsabgabe (LSVA) erhoben. Je nach Emissionsstufe gelten unterschiedliche Preise pro Tonne und Kilometer ab einem Fahrzeuggewicht von mehr als 3.5t:

Kategorie	Eurokategorie	Tarif
1	Euro 3,2,1 und 0	3.1 Rp./tkm
2	Euro 4 und 5	2.69 Rp./tkm
3	Euro 6	2.28 Rp./tkm

Tabelle 1: Höhe der LSVA für verschiedene Euroklassen – gültig in 2020 (Eidgenössische Zollverwaltung, 2017)

In dieser Studie werden nur Dieselfahrzeuge mit einer Euro-Kategorie 6 berücksichtigt. Weitere Annahmen müssen im Hinblick auf den Vergleich von Maut in Deutschland und Österreich und der LSVA in der Schweiz getroffen werden. Die Maut in Deutschland und Österreich gilt nur für Autobahnen und ausgewählte Fernstrassen, wohingegen sich die Schweizerische LSVA auf das gesamte Strassennetz erstreckt. Zugunsten einer pragmatischen Handhabung wird im Weiteren vereinfachend angenommen, dass die Maut für alle Bereiche des Strassennetzes auch in den beiden Ländern (D und A) gilt. Die Formel für die Kosten durch die LSVA ist das Produkt aus Preis pro tkm, Gesamtgewicht des Fahrzeugs (also Leergewicht und Zuladung) sowie die Fahrleistung über die Einsatzdauer (also Jahresfahrleistung mal Einsatzdauer):

$$K_{LSVA} = k_{LSVA,i} * (G_{leer} + G_{Ladung}) * D_J * L$$



In Österreich gelten bei den Strassenbenutzungsgebühren unterschiedliche Preise pro km je nach Anzahl der Achsen:

Anzahl Achsen	Maut in €/km
Zwei Achsen	0,1967
Drei Achsen	0,27619
Vier Achsen und mehr	0,41039

Tabelle 2: Höhe der österreichischen Maut in Abhängigkeit von der Achsenanzahl

Die Werte der Tabelle gelten ebenfalls für Fahrzeuge der Euro-Kategorie 6 (Asfinag, 2020). Um die Höhe der Maut in Abhängigkeit vom Gewicht des Lkw beschreiben zu können, ist ein Zusammenhang zwischen Anzahl der Achsen und Gesamtgewicht des Lkw notwendig. Gemäss EU-Richtlinien haben zweiachsige Anhänger ein höchstzulässiges Gesamtgewicht von 18t und dreiachsige Anhänger ein höchstzulässiges Gesamtgewicht von 24t (Rat der Europäischen Union, 1996, S.19). Deshalb werden im weiteren Verlauf folgende Preise angenommen (s. Tabelle 1):

Gesamtgewicht Lkw	Maut in €/km
Bis 18t	0,1967
Bis 24t	0,27619
Alles über 24t	0,41039

Tabelle 3: Maut in Österreich für verschiedene Fahrzeuggewichte

Die Formel für die Kosten der Maut in Österreich ist das Produkt aus Fahrleistung in der Einsatzdauer und dem Preis pro km der Maut einer Gewichtsklasse:

$$K_{Maut} = k_{Maut,i} * D_j * L$$



In Deutschland gelten bzgl. der nationalen Mautabgaben für die Emissionsklasse Euro 6 folgende Preise pro km:

Fahrzeuggewicht	Preis in ct/km
Bis 12t	9.3
Bis 18t	12.8
Mehr als 18t, 3 Achsen	17.3
Mehr als 18t, 4 Achsen	18.7

Tabelle 4: Maut in Deutschland für verschiedene Fahrzeuggewichte (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2019)

Die Anzahl an Achsen wird in dieser Studie nicht unterschieden. Deshalb wird für Fahrzeuge mit einem Gewicht von mehr als 18t mit dem Mittelwert der Maut für drei- und vierachsige Fahrzeuge gerechnet:

Fahrzeuggewicht	Preis in ct/km
Bis 12t	9.3
Bis 18t	12.8
Mehr als 18t	18.0

Tabelle 5: Verwendete Mautsätze für Deutschland

Die Formel für die Berechnung der Kosten der deutschen Maut ist identisch zur Berechnung der Kosten der Maut in Österreich.

5.2.2 CNG/LNG

In der TCO-Rechnung dieser Studie werden die Antriebstechnologien CNG und LNG gemeinsam betrachtet, weil die Preise in der Anschaffung nahezu identisch und Unterschiede damit vernachlässigbar sind (Wietschel et al., 2019).

Auf den Antriebstechnologie-unabhängigen Grundpreis (Fahrzeuggestell) addieren sich zusätzlich die Kosten für einen Gasmotor sowie einen Gastank. Für den Gastank wird ein Preis von 6.5€/kWh verwendet, für den Gasmotor ein Preis von 39€/kW (Wietschel et al., 2019, S.39).



Die Formel für die Fahrzeugkosten über die antriebstechnologieunabhängigen Grundkosten hinaus ist:

$$K_{F,CNG} = k_{M,CNG} * P_M + k_{T,CNG} * F_T$$

Die Kapazität des Tanks F_T ist der Bruttoenergiebedarf, um eine geforderte Reichweite zurückzulegen:

$$F_T = \frac{V}{100km} * D_{proFahrt} * e_{Diesel} * \frac{\eta_{Diesel}}{\eta_{CNG/LNG}}$$

Für die Reparaturkosten wird mit 0.163€/km gerechnet (Wietschel et al., 2019, S.40). Die Berechnungsformel ist identisch zu der von Diesel mit der Ausnahme, dass der Kostensatz pro Kilometer etwas höher ist.

Erdgasfahrzeuge sind in Österreich und der Schweiz nicht von der Maut befreit. Deshalb wird die Maut für Erdgasfahrzeuge in Österreich und der Schweiz identisch zu Diesel berechnet. In Deutschland zahlen Erdgasfahrzeuge (Stand 2020) keine Maut. In dieser Studie wird dieser Mautvorteil allerdings nicht berücksichtigt, weil die Mautbefreiung nicht von der EU-Kommission genehmigt wurde und diese aktuell anstrebt den «deutschen Alleingang» zu revidieren (Hütten & Landwehr, 2020).

In Deutschland wird mit Treibstoffpreisen von 0.8229€/kg für LNG gerechnet (Rolande, 2020). Für die Schweiz wird ein Preis für LNG von 1.15CHF/kg angesetzt (Graf, 2018), während sich für Österreich keine spezifischen LNG-Preise finden liessen. Deswegen wird hier der verfügbare CNG-Preis von 1€ verwendet (gibgas, 2020), ohne Mehrwertsteuer ergeben sich 0.80€. Da in Interviews der Verbrauch an Diesel pro 100km abgefragt wurde, muss abgeschätzt werden, wie hoch der äquivalente Verbrauch an LNG ist. Dafür wird der Dieserverbrauch über die Einsatzdauer in einen Antriebstechnologie-unabhängigen Nettoenergieverbrauch umgerechnet. Mithilfe der Energiedichte von LNG und dem Wirkungsgrad von Gasmotoren wird dieser Energieverbrauch in eine Menge an LNG in kg transformiert. Diese Treibstoffmenge wird mit dem Preis von LNG in die Treibstoffkosten umgerechnet:

$$P = \frac{V}{100km} * D_I * L * \frac{e_{Diesel}}{e_{CNG/LNG}} * \frac{\eta_{Diesel}}{\eta_{CNG/LNG}} * p_{CNG/LNG}$$

Bis auf die Energiedichte von Erdgas $e_{CNG/LNG}$ wurden bereits für das CO₂-Lebenszyklusanalyse alle Werte recherchiert. Für die Energiedichte von Erdgas wird der Heizwert von Methan herangezogen. Dieser liegt bei 13.9kWh/kg (Meier, 2014, S.1).



5.2.3 BEV

Die Fahrzeuganschaffungskosten beinhalten neben den Antriebstechnologie-unabhängigen Grundkosten die Kosten für die Batterie. Die Kosten für den Elektromotor fließen nicht in die TCO ein, weil diese im Vergleich zu Verbrennungsmotoren sehr gering sind (Winterhagen, 2016). Die Kosten für die Batterie werden berechnet, indem der Preis pro kWh Kapazität mit der notwendigen Kapazität multipliziert wird:

$$K_{F,BEV} = k_{T,BEV} * F_T$$

Die Kapazitätsberechnung der Batterie erfolgt analog zur Berechnung der Kapazität des Tanks von Gasfahrzeugen mit dem Unterschied, dass anstelle des Wirkungsgrads von Gasfahrzeugen, mit dem von BEV gerechnet wird:

$$F_T = \frac{V}{100km} * D_{proFahrt} * e_{Diesel} * \frac{\eta_{Diesel}}{\eta_{CNG/LNG}}$$

Für den Preis pro kWh einer Batterie k_B wurden zahlreiche unterschiedliche Angaben gefunden, welche erhebliche Schwankungen aufweisen: Der geringste recherchierte Wert liegt bei 84€/kWh (Horvath&Partners, 2019). Der höchste in der Recherche gefundene Wert liegt bei 509€/kWh (Gnann et al., 2017, S.57). Für den Strassengüterverkehr wird hier eine aktuelle Studie von 2019 (Wietschel et al., 2019, S.33) herangezogen, die mit einem Batteriepreis von 300€/kWh rechnet.

Die Wartungskosten für einen BEV sind in einer Studie von Hacker et al. (Hacker et al., 2020, S.18) mit ungefähr zwei Drittel des Preises der Wartungskosten für einen Diesel angegeben. Da für Dieselfahrzeuge mit einem Wartungs-Preis von 0.146€/km gerechnet wird, werden für BEV zwei Drittel dieses Preises, also 0.097€/km angesetzt.



BEV sind in Deutschland und der Schweiz von der Maut bzw. der Leistungsabhängigen Schwerverkehrsabgabe (LSVA) befreit (Eidgenössische Zollverwaltung, 2017) (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2019). Deshalb werden für BEV in Deutschland und der Schweiz keine zusätzlichen Kosten berechnet. In Österreich gelten für BEV reduzierte Mautsätze im Vergleich zu Dieselfahrzeugen:

Anzahl Achsen	Preis in €/km
Zwei Achsen	0.0969
Drei Achsen	0.13647
Vier Achsen und mehr	0.20421

Tabelle 6: Höhe der Maut in Österreich für elektrische Nutzfahrzeuge

(Asfinag, 2020)

Analog zu der Maut für Dieselfahrzeuge in Österreich wird dieser Mautsatz als gewichtsabhängige Maut dargestellt:

Fahrzeuggewicht	Preis in €/km
Bis 18t	0.0969
Bis 24t	0.13647
Alles über 24t	0.20421

Tabelle 7: Höhe der Maut für elektrische Nutzfahrzeuge in Abhängigkeit vom Fahrzeuggewicht

Als Treibstoffkosten gelten für BEV die nationalen Stromkosten. Diese werden berechnet, indem der Dieserverbrauch in einen Antriebstechnologie-unabhängigen Nettoenergieverbrauch umgerechnet wird, aus dem der Energiebedarf für ein BEV mithilfe dessen Wirkungsgrades bestimmt wird. Dieser Energieverbrauch wird mit dem jeweiligen Strompreis pro kWh multipliziert:

$$P = \frac{V}{100km} * D_J * L * e_{Diesel} * \frac{\eta_{Diesel}}{\eta_{BEV}} * p_{strom}$$

Für Deutschland wird mit einem Strompreis von 15.98ct/kWh gerechnet (Bundesnetzagentur, 2019, S.11). Für die Schweiz gilt hier ein Strompreis von 11.22 Rappen/kWh (Gruppe Grosser Stromkunden, 2019). Für Österreich wird ein Strompreis von 0.2102€/kWh angesetzt (Österreichs Energie, 2020).



Exkurs: BEV-Lkw mit austauschbaren Batterien

Eine aktuelle Schwachstelle von BEV sind die langen Ladezeiten. Eine mögliche Lösung für dieses Problem sind BEV mit austauschbaren Batterien (Lei Caixia & Yina, 2018). Ein Hauptnachteil dieses Alternativszenarios sind die zusätzlich benötigten Batterien, welche, wie in den TCO-Berechnungen bereits aufgezeigt, äusserst kostenintensiv sind. Die eigenen Analysen, basierend auf dem Rechenkonzept dieser Studie, ergaben, dass die Batterie (je nach Fahrzeugkonfiguration) für deutlich über 50% der Gesamtkosten des BEV verantwortlich ist. Die Anschaffung von mehreren Batterien führt zu einem erheblichen Anstieg der TCO. In den eigenen Rechnungen werden 3000 Ladezyklen angenommen, bevor eine Batterie ausgetauscht werden muss. Werden nun mehrere Batterien verwendet, so wird eine einzelne Batterie weniger stark beansprucht, die Lebenszeit steigt also. In dieser Hinsicht können zumindest langfristig und anteilig die zusätzlichen Kosten angeglichen/ausgeglichen werden.

5.2.4 FCEV

Bei FCEV werden auf die Antriebstechnologie-unabhängigen Grundkosten die Kosten für den Wasserstofftank und die Brennstoffzelle aufaddiert. Der Preis für den Wasserstofftank liegt bei 36.5€/kWh. Für den Preis der Brennstoffzelle werden 400€/kW angenommen (Gnann et al., 2017, S.58). Die Anschaffungskosten für ein FCEV über die antriebstechnologieunabhängigen Grundkosten hinaus werden mit folgender Formel berechnet:

$$K_{F,FCEV} = k_{T,FCEV} * F_T + k_{M,FCEV} * P_M$$

Die Kapazität des Wasserstofftanks F_T wird analog zu der Kapazität eines Gastanks bzw. einer Batterie ermittelt:

$$F_T = \frac{V}{100km} * D_{proFahrt} * e_{Diesel} * \frac{\eta_{Diesel}}{\eta_{FCEV}}$$

Die Reparaturkosten von FCEV werden äquivalent zum BEV berechnet, indem mit der relativen Höhe der Reparaturkosten aus (Hacker et al., 2020, S.18) und den Reparaturkosten von Diesel die absoluten Reparaturkosten eines BEV bestimmt werden. Die Reparaturkosten von FCEV sind 7/9 der Reparaturkosten von Diesel, damit ergeben sich Reparaturkosten für FCEV von 0.114€/km.

Für Deutschland wird mit Treibstoffkosten von 9.50€/kg (Finke, 2020). für die Schweiz mit einem Preis von 11.50CHF pro Kilogramm Wasserstoff gerechnet (Möckli, 2020). Für Österreich liegt der Preis mit 9€/kg am niedrigsten (Fischer, Zeilinger, 2020). Die



Treibstoffkosten für FCEV werden mit demselben Verfahren berechnet wie die Treibstoffkosten für LNG, d.h. der Dieserverbrauch wird in Wasserstoffverbrauch umgerechnet:

$$P = \frac{V}{100km} * D_J * L * \frac{e_{Diesel}}{e_{Wasserstoff}} * \frac{\eta_{Diesel}}{\eta_{FCEV}} * p_{CNG/LNG}$$

Die Energiedichte von Wasserstoff $e_{Wasserstoff}$ liegt bei 33.3kWh/kg (Fraunhofer ISE, 2019, S.2).

In Deutschland und in Österreich sind FCEV genau wie BEV von der Maut bzw. LSVA befreit (Eidgenössische Zollverwaltung, 2017) (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2019). In Österreich gelten für FCEV die gleichen niedrigeren Mautsätze wie für BEV (Asfinag, 2020). Die Berechnung der Maut sind also identisch zu der von BEV.

5.2.5 Biodiesel und synthetische Kraftstoffe

Für die Antriebstechnologien Biodiesel und synthetische Kraftstoffe werden in dieser Studie keine quantitativen Analysen, sondern qualitative Kostenvergleiche erhoben.

5.2.6 Vergleich der Antriebstechnologien

Das nachstehende Diagramm stellt einen TCO-Vergleich für die Antriebstechnologien Diesel, LNG, BEV und FCEV für folgende grundlegende Annahmen dar: Verbrauch von 30l/100km für das Dieselfahrzeug als Referenztechnologie, Jahresfahrleistung von 100'000km, 3 Jahre Einsatzdauer, Leistung des Lkw von 330kW, 15t Leergewicht, 25t Nutzlast und Reichweite von 450km für die alternativen Antriebe.

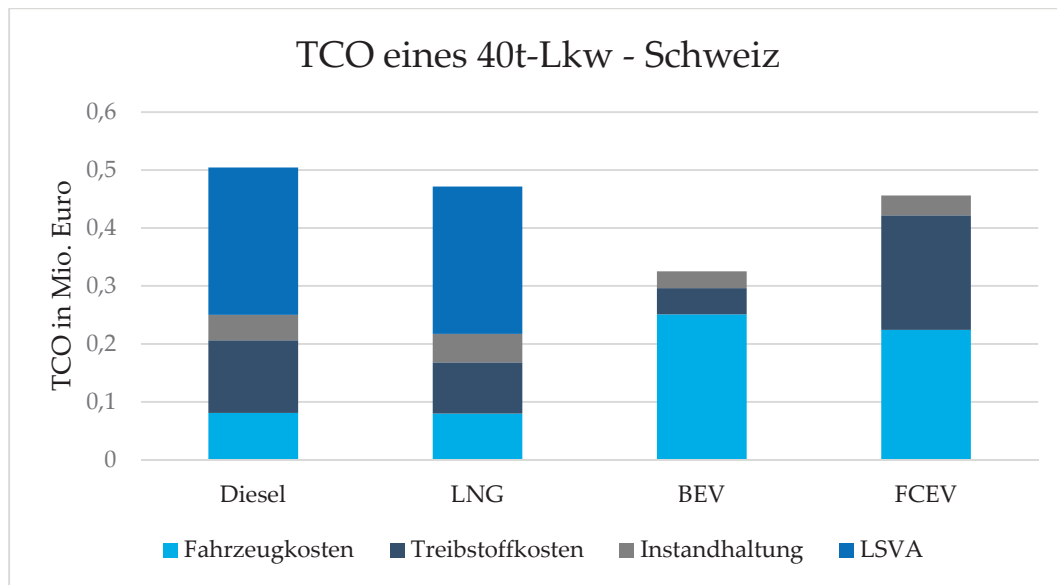


Abbildung 10: TCO für 40-Tonner in der Schweiz (eigene Darstellung)

LNG-Lkw sind in diesem Szenario insgesamt etwas günstiger als Diesel-Lkw. Es ist vor allem erkennbar, dass insbesondere die Treibstoffkosten für LNG spürbar geringer sind als für Diesel. BEV sind durch die Befreiung von der LSVA deutlich günstiger als alle anderen Antriebstechnologien. FCEV sind hingegen trotz der LSVA-Befreiung nicht deutlich günstiger als Diesel. BEV charakterisieren sich zum einen durch ihre sehr geringen Betriebskosten. Im Gegensatz dazu sind allerdings die Anschaffungskosten insgesamt sehr hoch, was insbesondere auf die hohen Kosten der Batteriepacks zurückzuführen ist. So ergibt sich mit dem entwickelten Rechenkonzept unter der Annahme einer Reichweite von 450km und einem Energieverbrauch, der bei einem Dieselfahrzeug 30l/100km entspricht, ein Kostenanteil der Batterie von deutlich über 50% am Gesamtfahrzeug. FCEV haben dagegen sowohl hohe Betriebskosten als auch hohe Anschaffungskosten (siehe Exkurs Kostentreiber Antriebstechnologien 5.4). Dass BEV in der Schweiz günstiger als Diesel und FCEV ähnlich teuer wie Diesel sind, liegt in erster Linie an der Befreiung von der LSVA: Fallen die LSVA-Vorteile für BEV und FCEV weg, so sind deren TCO deutlich höher als die von Diesel. Die Wirtschaftlichkeit von BEV und FCEV ist also unmittelbar von der LSVA-Befreiung abhängig. Wie lange diese Technologien von der LSVA befreit sein werden, ist derzeit ungewiss. Ein Antrag auf die generelle Befreiung von der LSVA bis mindestens in das Jahr 2028 wurde nicht angenommen (Schweizer Nationalrat, 2018).

Die Anschaffung von Elektro-Nutzfahrzeugen ist mit einem gewissen Risiko behaftet, da sie lediglich aufgrund der aktuellen LSVA-Befreiung in der Schweiz wirtschaftlich zu betreiben sind.



Exkurs: Darstellung der LSVA-Befreiung als CO₂-Preis

Die LSVA-Befreiung in der Schweiz bringt erhebliche Kostenvorteile mit sich. Im Folgenden wird untersucht, inwiefern die Befreiung von in der Nutzungsphase emissionsfreien Antrieben von der LSVA sich mit einem CO₂-Preis vergleichen lässt. Dazu wird zum einen der Kostenvorteil durch eine LSVA-Befreiung für einen 40-Tonner pro km untersucht (Vergleich BEV und Diesel). Für die Eurokategorie 6 liegt die LSVA bei 2.28 Rappen pro tkm, für einen 40-Tonner sind das 0.912 CHF/km. Für die Höhe der CO₂-Einsparungen wird die Fahrzeugherstellung nicht berücksichtigt, weil die CO₂-Emissionen aus dieser Phase nicht von der zurückgelegten Strecke abhängig sind. Es wird ausserdem von einem Dieserverbrauch von 30l/100km ausgegangen. Damit ergeben sich CO₂-Emissionen von 0.96 kg CO₂/km für Diesel, die ein BEV einsparen würde. Der Kostenvorteil durch die LSVA-Befreiung wird nun durch die Höhe der CO₂-Einsparungen geteilt, um einen Preis pro Tonne CO₂ zu erhalten:

$$\frac{0,912 \text{ CHF/km}}{0,96 * 10^{-3} \text{ t CO}_2/\text{km}} = 950 \frac{\text{CHF}}{\text{t CO}_2}$$

Zum Vergleich: Schweden erhebt die weltweit höchste CO₂-Steuer mit umgerechnet 115 €/t CO₂ (Tutt, 2019). Um das 1.5°C-Ziel zu erreichen, wird angenommen, dass ein Preis von mindestens 135 US-\$/t CO₂ notwendig sein wird. Die obere Grenze liegt hingegen bei mehreren Tausend Euro (Umweltbundesamt, 2019, S.5). Die LSVA-Befreiung von BEV und FCEV ist also als zeitlich begrenzte Starthilfe, von einer langfristigen Befreiung kann nicht ausgegangen werden. Unter der Annahme, dass die LSVA-Befreiung für emissionsfreie Antriebstechnologien endet und stattdessen eine modifizierte CO₂-Steuer greift, wird der Kostenvorteil von BEV und FCEV deutlich geringer als bei der LSVA-Befreiung ausfallen.

Für 40-Tonner in Deutschland zeigt sich ein ganz anderes Bild:

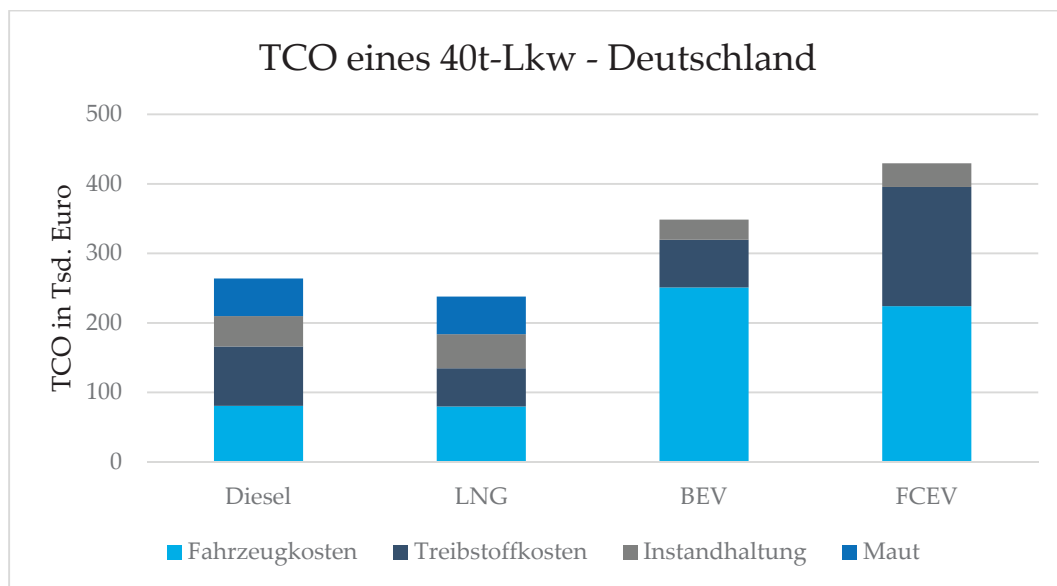


Abbildung 11: TCO für 40-Tonner in Deutschland (eigene Darstellung)

Die Maut in Deutschland ist deutlich geringer als die LSVA in der Schweiz und hat damit einen deutlich geringeren Anteil an den TCO. Da die Maut vergleichsweise ausfällt, reicht der Kostenvorteil, der sich durch eine Mautbefreiung ergibt, nicht aus, um BEV und FCEV gegenüber Diesel wettbewerbsfähig zu machen. Ein ähnliches Bild ergibt sich für Österreich, wo für BEV und FCEV anstelle einer Mautbefreiung vergünstigte Sätze gelten. Auch hier reichen die günstigeren Mautsätze nicht aus, um BEV und FCEV gegenüber Diesel wettbewerbsfähig zu machen. Durch den relativ günstigen Preis von Wasserstoff in Österreich liegen die TCO von BEV und FCEV näher beieinander:

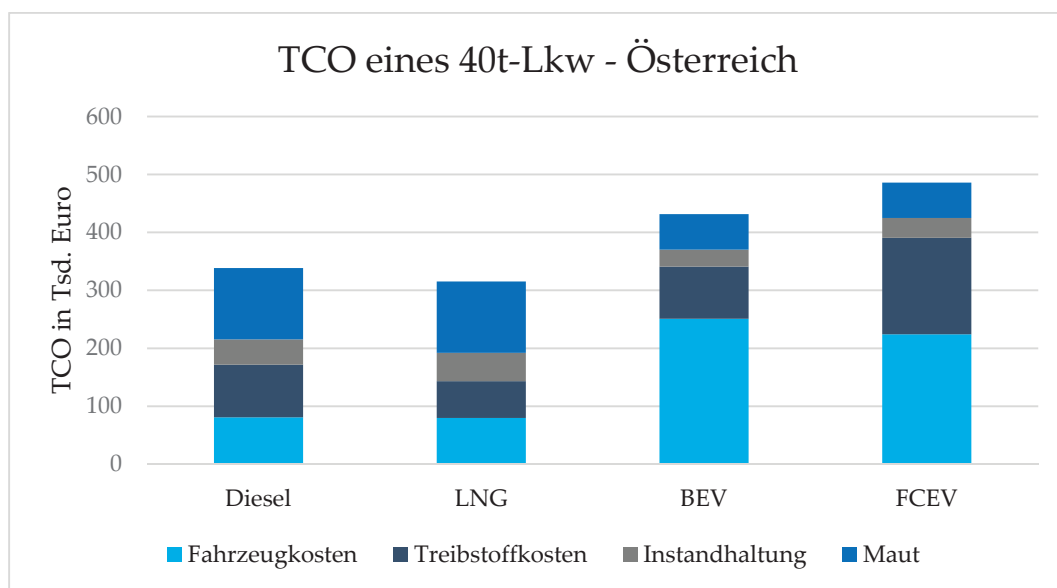


Abbildung 12: TCO für 40-Tonner in Österreich (eigene Darstellung)



Anders als beim CO₂-Vergleich zeigen sich beim Kostenvergleich Unterschiede zwischen Sprinterklasse und 40-Tonnern. Die getroffenen Annahmen in der Sprinterklasse sind: Verbrauch von 12l/100km, 2t Leergewicht, 1t Nutzlast, Jahresfahrleistung von 35'000km, 4 Jahre Einsatzdauer, 150km Reichweite und Motorenleistung von 110kW.

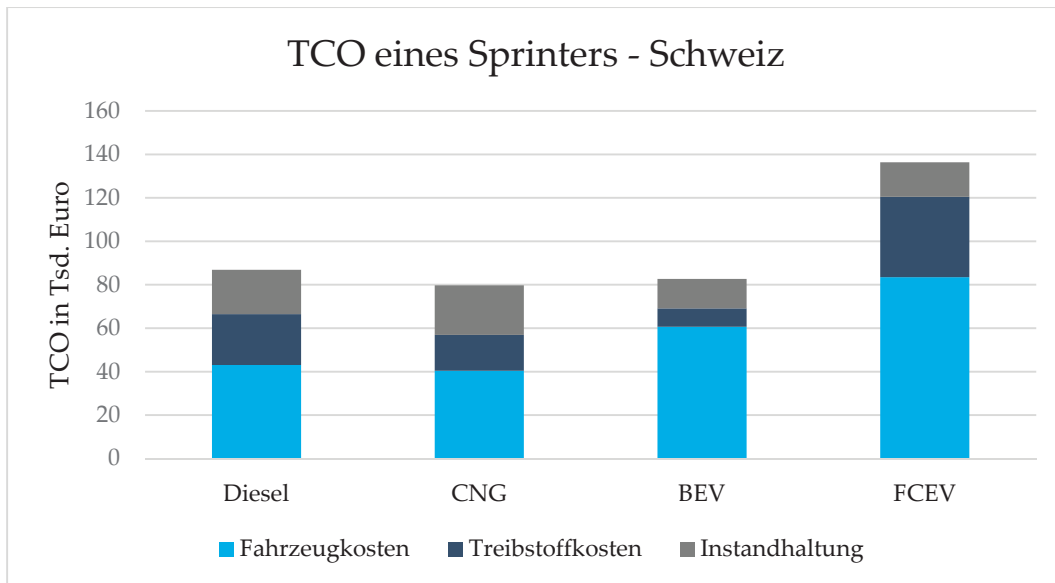


Abbildung 13: TCO von Sprintern in der Schweiz (eigene Darstellung)

Während FCEV weiterhin deutlich teurer sind als herkömmliche Antriebe, weisen BEV ähnlich hohe TCO wie Diesel auf. Die Kostenparität wird bei Sprintern erreicht, obwohl keine LSVA-Vorteile mehr vorliegen. Dies lässt sich in erster Linie auf die deutlich kleinere Batterie zurückführen (kleinere Batterie durch geringeren Energieverbrauch pro 100km und geringere benötigte Reichweite). Für Deutschland ergibt sich ein ähnliches Bild:

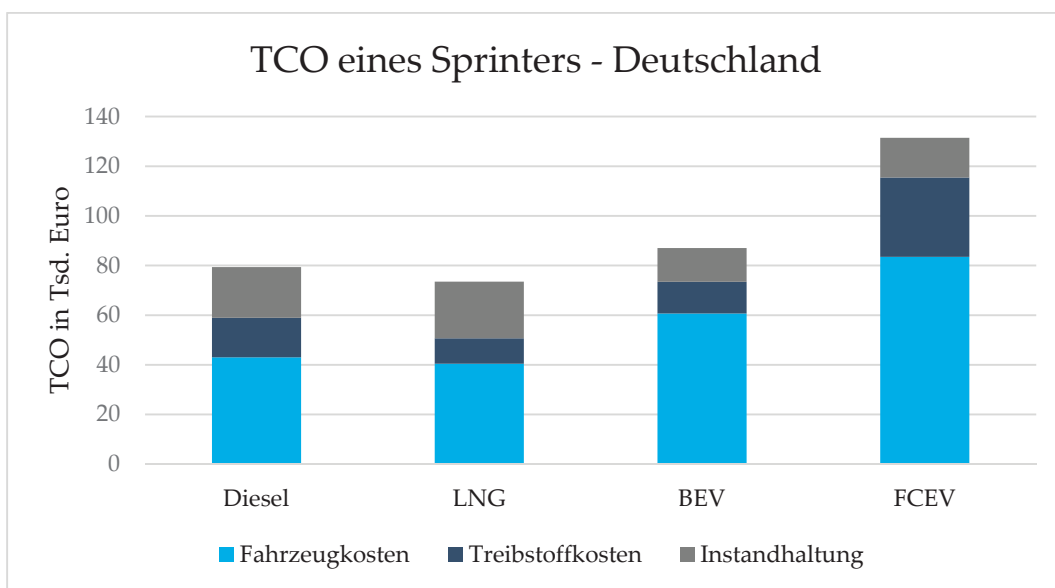


Abbildung 14: TCO von Sprintern in Deutschland (eigene Darstellung)



Es fällt allerdings auf, dass in Deutschland BEV, relativ zu CNG und LNG, höhere TCO aufweisen als in der Schweiz. Dies ergibt sich aus den relativ hohen Stromkosten und den gleichzeitig relativ günstigen Treibstoffkosten in Deutschland. Für Österreich zeigt sich ein sehr ähnlicher TCO-Vergleich wie in Deutschland:

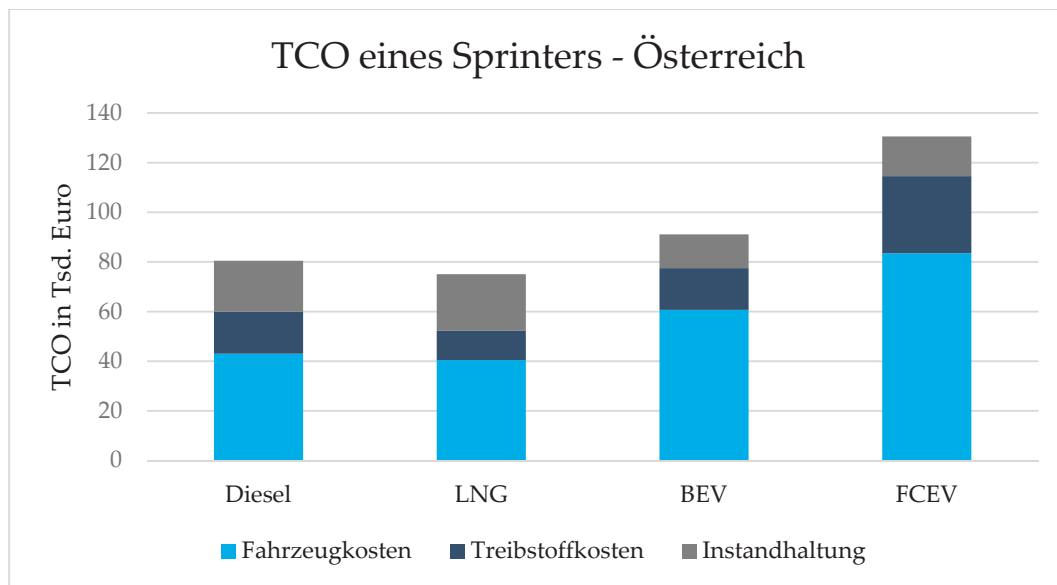


Abbildung 15: TCO von Sprintern in Österreich (eigene Darstellung)



Exkurs: Kostentreiber der Antriebstechnologien BEV und FCEV

Für BEV und FCEV werden im Folgenden die Kostentreiber beleuchtet und Forschungsprojekte genannt, die dazu beitragen können, die Gesamtkosten dieser Antriebstechnologien in Zukunft zu senken. Die hohen TCO von BEV sind vor allem den Anschaffungskosten geschuldet. Die hohen Anschaffungskosten sind wiederum insbesondere auf die Batterie zurückzuführen. Als Beispiel für ein Verfahren, mit dem in Zukunft die Kosten gesenkt werden können, sei die Trockenbeschichtung genannt: In der Elektrodenfertigung für Lithium-Ionen-Batterien werden überwiegend nass-chemische Prozesse eingesetzt. Wegen der verwendeten Lösemittel ist eine aufwendige Abgasreinigung notwendig. Das Trocknen der Elektrode ist ausserdem sehr energieintensiv. Im Labormassstab wurde bereits ein Trockenbeschichtungsverfahren angewendet, bei dem keine Lösemittel verwendet werden mussten. Durch Anwendung dieses Verfahrens werden deutlich geringere Produktionskosten in Aussicht gestellt (Kwade & Jess, 2020).

Für FCEV ist den Diagrammen zu entnehmen, dass sowohl die Anschaffungskosten als auch die Treibstoffkosten sehr hoch sind. Für eine Leistung von 330kW kosten allein die benötigten Brennstoffzellen 132'000€. Um die Kosten für Brennstoffzellen zu senken, werden einem Projekt Brennstoffzellen entwickelt, bei denen statt einer Gold- eine Graphitbeschichtung eingesetzt wird. Daraus folgt eine Halbierung der Beschichtungskosten (Fraunhofer IWS, 2020). Es wird auch ebenfalls daran gearbeitet, die Kosten für die Herstellung von Wasserstoff zu senken. Gemäss Angaben von Höller (Höller, 2020) werden die Kosten für die Herstellung von Wasserstoff mit den eigenen Elektrolyseuren bei nur 4€/kg liegen. Erreicht wird dieser Preisvorteil u.a. dadurch, dass weniger Edelmetalle wie Platin und Iridium zum Einsatz kommen.

In der TCO-Rechnung bisher unberücksichtigt sind synthetische Kraftstoffe. Für diese wird keine umfassende TCO-Rechnung aufgestellt, sondern es finden lediglich die Treibstoffkosten Berücksichtigung: Synthetische Kraftstoffe würden nach aktuellen Schätzungen alleine in der Herstellung etwa 4.50€/l kosten (ADAC, 2020c) Solange diese hohen Treibstoffkosten, die aus dem geringen Wirkungsgrad synthetischer Kraftstoffe verglichen zu einer direkten Stromnutzung resultieren, bestehen, ist es naheliegend, zunächst technische Lösungswege mit geringeren Umwandlungsverlusten (also insbesondere BEV und FCEV) zu verfolgen (Agora Verkehrswende, 2018, S.12). Eine Ausnahme für die hohen Treibstoffkosten kann aber synthetischer Kraftstoff sein, der auf Basis von Geothermie erzeugt wird: Hier sind sehr geringe Kosten für die Herstellung synthetischer Kraftstoffe

möglich. Der Nachteil von synthetischen Kraftstoffen, die mit Geothermie hergestellt werden, liegt im geringen Energiepotenzial (Agora Verkehrswende, 2018, S.20). Deshalb werden synthetische Kraftstoffe aus Geothermie als eine CO₂-einsparende relativ kostengünstige Nischenlösung bewertet. Ein Beispiel für ein Geothermie-Projekt, das Synthesegas herstellt, ist die Nordur Power SNG AG. Hier wird Synthesegas in Island hergestellt und anschliessend in die Schweiz exportiert (Punkt4Info, 2020).

6 Umfassender Vergleich der Antriebstechnologien

Auf Basis der bisherigen Detailanalysen folgt jetzt ein umfassender Vergleich der Antriebstechnologien. Dafür werden zunächst die Ergebnisse aus Kapitel 5 verwendet, um Zusammenhänge zwischen CO₂-Emissionen und Kosten der Antriebstechnologien zu untersuchen. Darüber hinaus werden in diesem Kapitel zusätzliche Kriterien definiert und in die Bewertung eingebracht. Die zusätzlichen Kriterien sind Nutzlast, Reichweite und Umsetzbarkeit.

6.1 Paralleler Vergleich von Kosten und CO₂-Emissionen

In diesem Kapitel werden die CO₂-Emissionen und die TCO der Antriebstechnologien gemeinsam betrachtet. Für Deutschland ergibt sich im Status quo folgendes Bild:

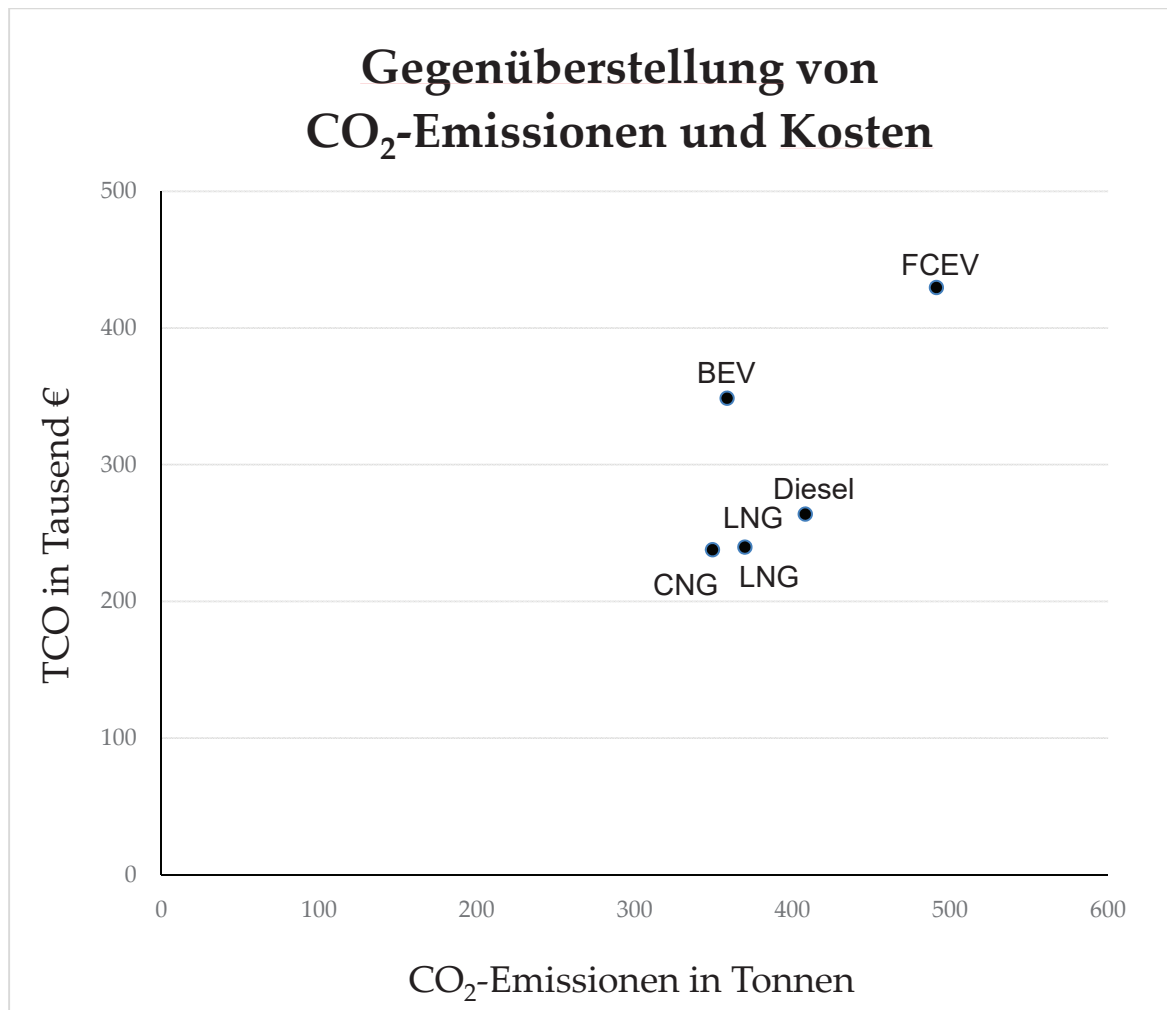


Abbildung 16: CO₂- und Kostenvergleich für 40-Tonner in Deutschland (eigene Darstellung)

Da für CNG kein getrennter Kostenvergleich aufgestellt wurde, werden dieselben Kosten wie für LNG angenommen. In diesem Vergleich zeigen sich CNG und LNG als vorteilhafte Technologien: Es können sowohl (wenn auch nur geringe) CO₂- und Kosteneinsparungen im Vergleich zum Diesel erzielt werden. BEV und insbesondere FCEV sind allerdings deutlich teurer. Mit deutschem Strommix können BEV keine signifikanten CO₂-Einsparungen erzielen. Für FCEV sind die CO₂-Emissionen sogar deutlich höher als für Diesel. Werden anstelle des deutschen Strommix erneuerbare Energien für die Stromgewinnung genutzt, ergibt sich das folgende Bild:

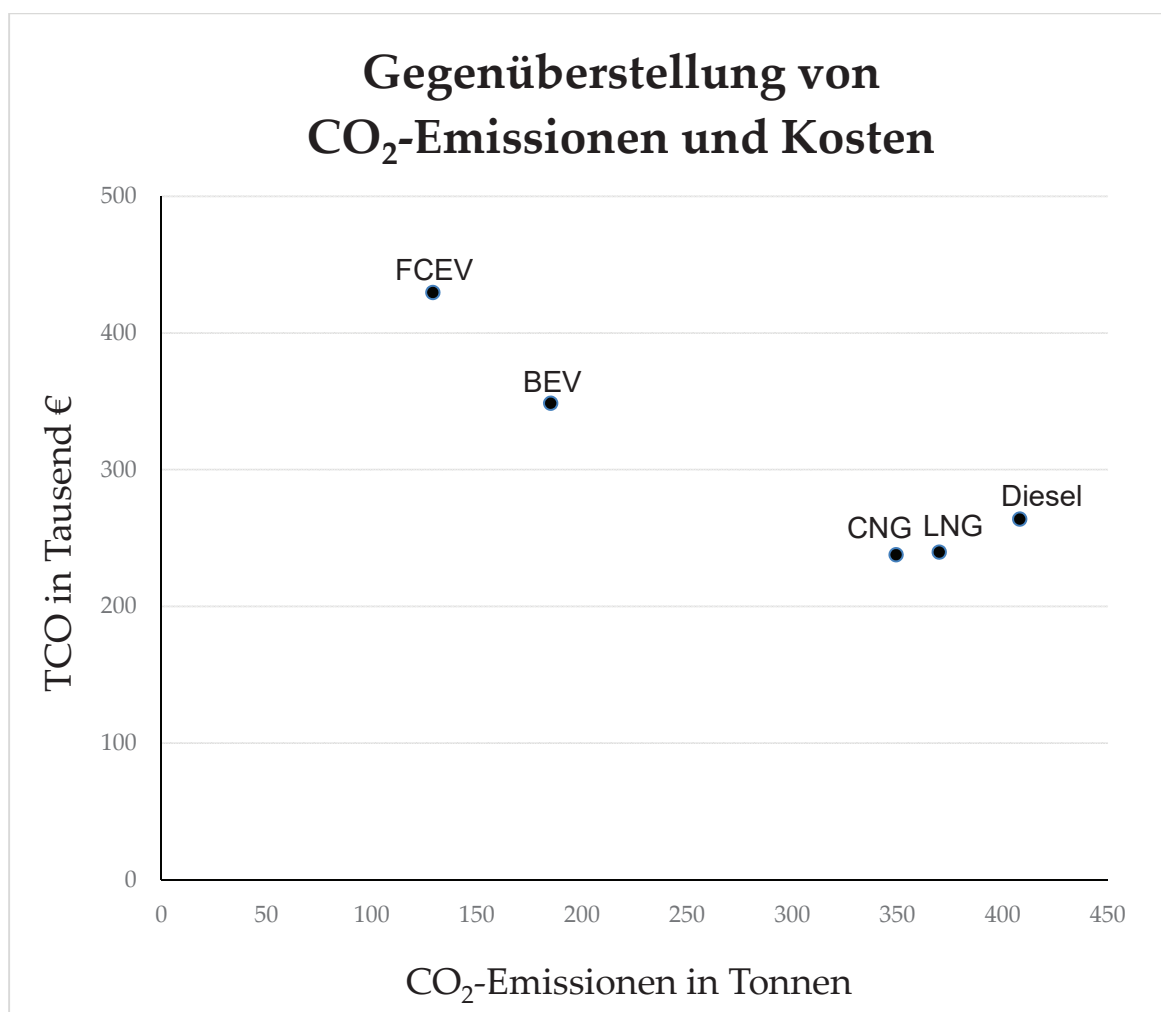


Abbildung 17: CO₂- und Kostenvergleich für 40-Tonner in Deutschland mit Strom aus erneuerbaren Energien (eigene Darstellung)

Die CO₂-Emissionen von BEV und FCEV liegen nun deutlich unter denen von Diesel. Anders als mit deutschem Strommix sind CNG und LNG keine dominierenden Lösungen mehr, weil sie nur noch hinsichtlich der Kosten, nicht aber hinsichtlich der CO₂-Emissionen am besten abschneiden. Eine starke Reduzierung der CO₂-Emissionen geht uindessen mit einem hohen Kostenanstieg einher.



Für die Schweiz ergibt sich folgendes Bild:

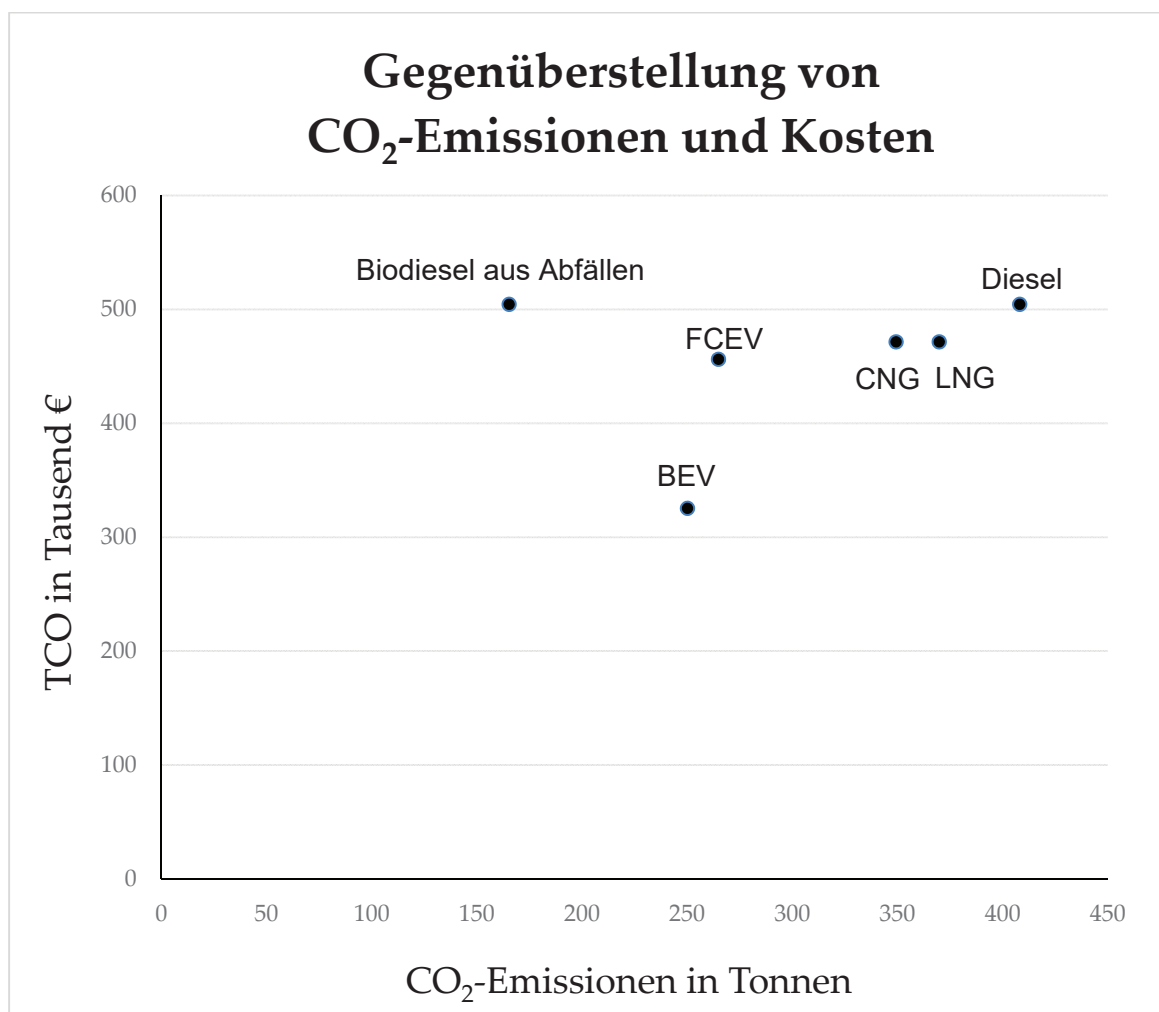


Abbildung 18: CO₂- und Kostenvergleich für 40-Tonner in der Schweiz (eigene Darstellung)

In diesem Diagramm wird die LSVA-Befreiung von BEV und FCEV berücksichtigt. In das Diagramm wurde Biodiesel aus Abfällen integriert, da der Anteil der mit Biodiesel fahrenden Nutzfahrzeuge in der Schweiz relativ hoch ist (Caprez & Bachmann, 2019). Weil für Biodiesel keine eigene TCO-Rechnung erstellt wurde, wird mit denselben Preisen gerechnet wie für Diesel. Es fällt auf, dass dieser noch besser abschneidet als BEV und FCEV, die in diesem Szenario ihre Energie mit dem aktuellen Schweizer Strommix beziehen. Hier sei wiederholt auf die hohe Volatilität der Werte hinsichtlich der CO₂-Emissionen für die Batterieherstellung hingewiesen. Eine pauschale Aussage, dass Biodiesel weniger CO₂-Emissionen verursacht als BEV mit Schweizer Strommix, sollte nicht getroffen werden. Für eine solche Aussage ist die Unsicherheit hinter den angenommenen Werten zu gross. Hinsichtlich Biodiesel sollte ausserdem bedacht werden, dass es sich um eine Nischenlösung handelt: Das Mengenpotenzial von Biomasse aus Abfällen und Reststoffen ist viel zu gering, um in ausreichender Menge Kraftstoff für den Verkehr liefern zu können (Agora Energiewende, 2018, S.10).



Exkurs: Skalierbarkeit von Biodiesel aus Abfällen

Eine gesonderte Rechnung veranschaulicht, wie gering der Anteil des Kraftstoffbedarfs ist, der sich mit Biodiesel abdecken lässt: In der Schweiz werden jährlich 215 Millionen Liter Biodiesel aus gebrauchtem Speiseöl getankt, davon sind 90% importiert (Caprez & Bachmann, 2019). Mit einem Dieserverbrauch des Schweizer Strassengüterverkehrs von etwa 25PJ (Ganser & Reinhardt, 2008, S.17) und einer Energiedichte von Diesel von 9.91kWh/l, ergibt sich ein Dieselbedarf von ungefähr 700 Millionen Liter Diesel. Die in der Schweiz hergestellte Menge an Biodiesel aus Abfällen von 21,5 Millionen Liter reicht also gerade einmal aus, um 3% des Dieselbedarfs für den Schweizer Strassengüterverkehr zu decken.

Der Nachteil der geringen Skalierbarkeit von Biodiesel lässt sich durch den Einsatz von Biogas zu einem geringen Grad beheben. So hat Biogas im Vergleich zu Biodiesel, welcher durch den Anbau von Pflanzen gewonnen wird, eine höhere Ausbeute pro verwendeter Fläche (Umweltbundesamt, 2020a).

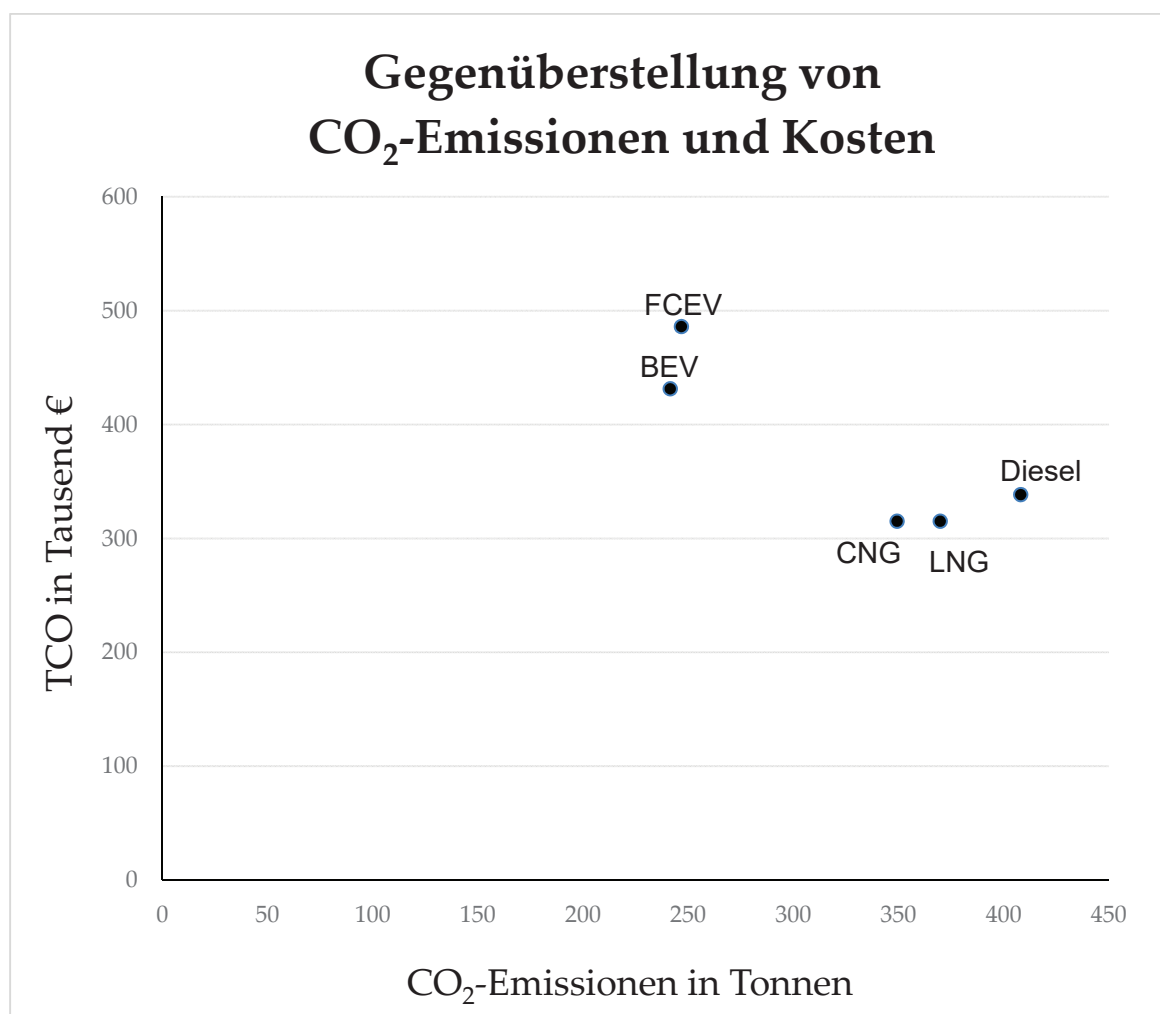


Abbildung 19: CO₂- und Kostenvergleich für 40-Tonner in Österreich (eigene Darstellung)



Für Österreich gilt: Mit dem dort vorzufindenden Strommix sind die CO₂-Emissionen von BEV und FCEV ähnlich wie in der Schweiz signifikant geringer als die von Diesel. Anders als in der Schweiz ist der Kostenvorteil durch die geringere Maut kleiner als die LSVA-Befreiung in der Schweiz, sodass BEV und FCEV deutlich teurer sind als Dieselfahrzeuge.

Exkurs: Einfluss der Umstellung von Diesel auf BEV für verschiedene Fahrzeuggrößen

In diesem Exkurs wird der Einfluss des Umstiegs von Diesel auf BEV für 40-Tonner und Sprinter verglichen. Dazu wird gegenübergestellt, welche Anzahl an Umstiegen von Sprintern einer Flotte von Diesel auf BEV dem Umstieg eines 40-Tonnners entspricht. Folgende Tabelle stellt die CO₂-Emissionen von Sprintern und 40-Tonnern konfiguriert als Diesel und BEV über ihren gesamten Lebenszyklus dar:

Fahrzeuggrösse	40-Tonner	Sprinter
CO ₂ -Emissionen als Diesel	408'000kg	56'320kg
CO ₂ -Emissionen BEV	185'023kg	24'670kg
CO ₂ Einsparung	222'977kg	31'650kg

Tabelle 8: Die Emissionen von 40-Tonner und Sprinter im Vergleich

Die Annahmen bzgl. Sprinter sind Verbrauch von 12l/100km, 2t Leergewicht, 1.5t Nutzlast, Jahresfahrleistung von 35'000km, Reichweite von 150km und klimaneutraler Strom. Die Annahmen an den 40-Tonner sind: Verbrauch von 30l/100km, 15t Leergewicht, 25t Nutzlast, Jahresfahrleistung von 100'000km, 3 Jahre Einsatzdauer, Reichweite von 450km und klimaneutraler Strom. Die Annahmen an den 40-Tonner sind: Verbrauch von 30l/100km, 15t Leergewicht, 25t Nutzlast, Jahresfahrleistung von 100'000km, 3 Jahre Einsatzdauer, Reichweite von 450km und klimaneutraler Strom. Setzt man diese CO₂-Einsparungen des Sprinters und des 40-Tonnners ins Verhältnis, so ergibt sich, dass die CO₂-Einsparungen durch den Umstieg eines 40-Tonnners ungefähr 7-mal so gross sind wie bei einem Sprinter. Auf der anderen Seite ist allerdings zu bedenken, dass die Analysen ergaben, dass batterieelektrische Antriebe insbesondere für schwere Nutzfahrzeuge mit hohen Reichweiten (unter Nichtberücksichtigung der Mautvorteile) sehr teuer sind, während batterieelektrische Antriebe in Sprintern gegenüber Dieselfahrzeugen nahezu wettbewerbsfähig sind.



Exkurs: Anschaffungsförderungen für Neuwagen im DACH-Raum

In diesem Exkurs werden Anschaffungsförderungen für Nutzfahrzeuge mit alternativen Antrieben beleuchtet. Es handelt sich hierbei um eine Momentaufnahme, da sich Art und Höhe der Förderungen häufig ändern.

In Deutschland können Anträge auf Beihilfe in Höhe von bis zu 15'000€ für den Austausch von Nutzfahrzeugen der Klassen I bis V gegen neue Nutzfahrzeuge der Klasse VI mit konventionellem Verbrennungsmotor, Elektro- und Wasserstoffantrieb sowie mit Gas betriebenen Antrieb gestellt werden. Für die Verschrottung von Bestandsfahrzeugen der Klassen 0 bis II werden 10'000€ gezahlt, für die Euroklassen III bis V 15'000€. Die Förderung ist an einige Bedingungen geknüpft: So ist für die neuen Nutzfahrzeuge ein Abbiegeassistent vorgeschrieben (Landwehr, 2021).

In der Schweiz werden Lieferwägen mit elektrischem Antrieb mit bis zu 2'000 CHF gefördert. Ausserdem gibt es viele kantonale Förderungen. (Swiss eMobility, 2020).

In Österreich wird die Anschaffung elektrischer Nutzfahrzeuge finanziell unterstützt. Diese liegt für Fahrzeuge der Klasse 3, also Nutzfahrzeuge mit einem Gewicht von mehr als 12t, bei 50'000€. Nutzfahrzeuge der Klasse N2, also mit einem Gewicht von 3.5-12t, werden mit maximal 20'000€ gefördert (ecomento, 2019).

6.2 Vergleich der Antriebstechnologien über alle Dimensionen

Zusätzlich zu den bereits analysierten Dimensionen CO₂-Emissionen und Kosten mittels TCO werden die Antriebstechnologien hinsichtlich drei weiteren Dimensionen bewertet: Nutzlast, Reichweite und Umsetzbarkeit. Für die Bewertung der Nutzlastverluste werden das eigene Berechnungskonzept sowie Studien von Dritten herangezogen. In den eigenen Rechnungen wird nur der Nutzlastverlust von BEV berücksichtigt. Der Nutzlastverlust für 40-Tonner liegt bei mehreren Tonnen. Insbesondere für Sprinter ist der relative Nutzlastverlust sehr hoch. Dieses Ergebnis deckt sich mit einer Studie von Roland Berger (Roland Berger, 2017, S.14).

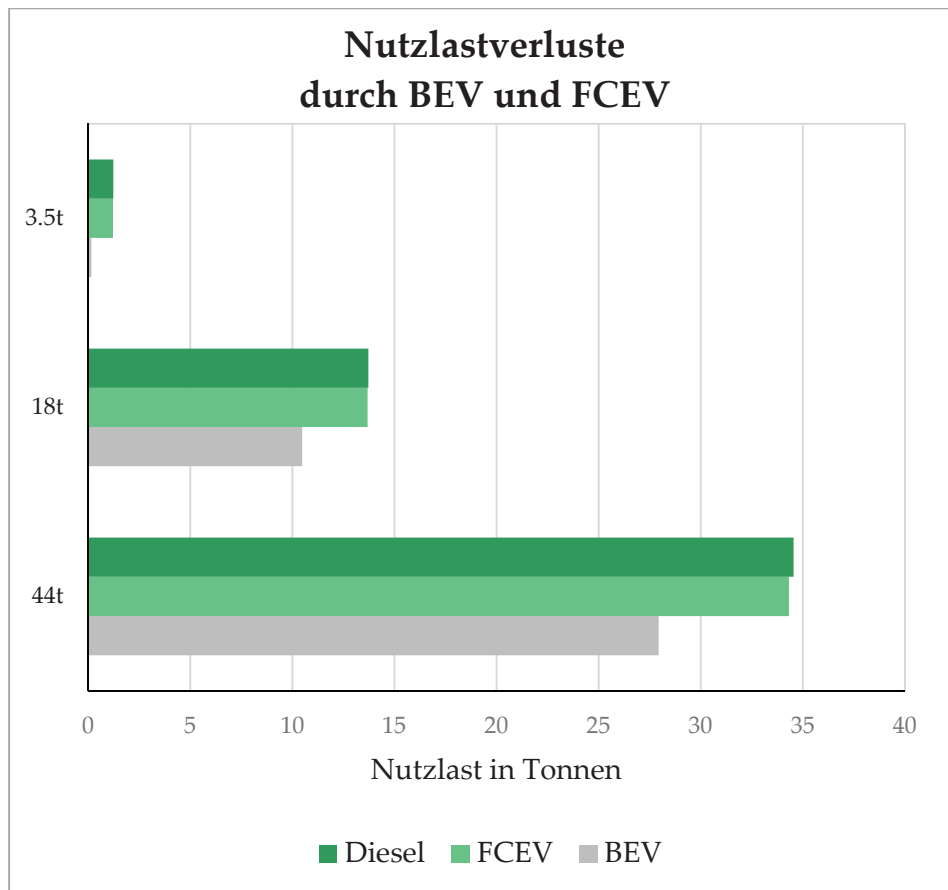


Abbildung 20: Nutzlastverluste für BEV und FCEV (eigene Darstellung angelehnt an Roland Berger)

Der Nutzlastverlust von FCEV fällt ausserdem deutlich geringer aus als für BEV. Die Vernachlässigung des Nutzlastverlusts für FCEV in den eigenen Berechnungen ist also unproblematisch. LNG-Lkw haben einen schwereren Tank als Dieselfahrzeuge und dadurch eine geringere Nutzlast (Kühnel, Hacker & Görz, 2018, S.18).

Exkurs: Nutzlastverluste der Antriebstechnologien

Während beim Vergleich der relativen CO₂-Emissionen der Antriebstechnologien für 40-Tonner und Sprinter keine nennenswerten Unterschiede gefunden wurden, zeigen sich beim Nutzlastverlust durch die Batterie beachtliche Unterschiede für die Fahrzeuggrößen:

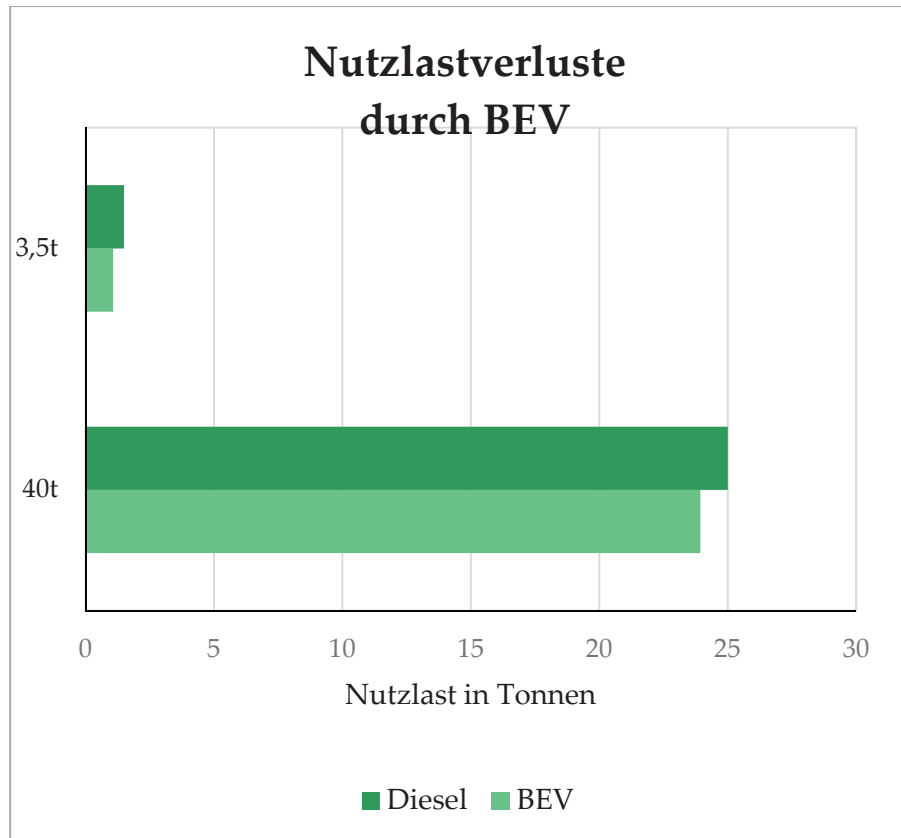


Abbildung 21: Nutzlastverluste von BEV gegenüber Diesel (eigene Darstellung)

Für den Sprinter werden folgende Annahmen getroffen: Energieverbrauch, der bei einem Dieselfahrzeug einem Verbrauch von 12l/100km entspricht, sowie Reichweite vom 200km. Für den 40-Tonner gelten die Annahmen: Energieverbrauch, der bei einem Dieselfahrzeug einem Verbrauch von 30l/100km entspricht und eine Reichweite von ebenfalls 200km. Für diese Annahmen ergibt sich ein Batteriegewicht von knapp 430kg für den Sprinter, was bei einer ursprünglichen Nutzlast von 1500kg einem Nutzlastverlust von 28.5% entspricht. Für den 40-Tonner folgt daraus ein Batteriegewicht von 1071kg, was einem Nutzlastverlust von 4.3% entspricht. Es zeigt sich also, dass für gleiche Reichweiten die relativen Nutzlastverluste bei 40-Tonnern deutlich geringer ausfallen als bei Sprintern. Unter alleiniger Betrachtung dieses Aspekts eignen sich BEV also eher für schwere Lkw als für kleine Sprinter. Der geringere relative Verlust an Nutzlast kann auch dafür eingesetzt werden, höhere Reichweiten zu realisieren: Für eine Reichweite des 40-Tonnern von 700km ergibt sich ein Batteriegewicht von 3747kg, was einem Nutzlastverlust von rund 15% entspricht. Ein Sprinter kann unter den



getroffenen Annahmen hingegen eine Reichweite von 700km nicht erreichen, weil das Batteriegewicht grösser als die Nutzlast von 1500kg wäre.

Die Empfindlichkeit von Sprintern hinsichtlich der geforderten Reichweite zeigt sich auch in den CO₂-Emissionen pro tkm. Für Sprinter mit einer Reichweite von 90 bzw. 150 km und den gemeinsamen Annahmen Verbrauch von 12l/100km, Leergewicht 2t, Nutzlast 1t, Jahresfahrleistung von 20'000km und Schweizer Strommix ergibt sich: Bei einer Reichweite von 150km liegen die CO₂-Emissionen bei 0.33kg CO₂/tkm, für eine Reichweite von 90km liegen sie hingegen bei 0.26kg CO₂/tkm. Die CO₂-Emissionen betragen für eine Reichweite von 150km also um 27% höher als bei einer Reichweite von 90km. Die höhere Reichweite und die damit grössere Batterie führen einerseits dazu, dass die absoluten CO₂-Emissionen durch die aufwendige Batterieherstellung deutlich grösser ausfallen. Der zweite Effekt der grösseren Batterie ist die geringere Nutzlast. Dadurch steigen zwar nicht die absoluten CO₂-Emissionen, wohl jedoch die CO₂-Emissionen pro tkm. Eine Empfehlung, die aus diesen Überlegungen resultiert, ist, BEV entgegen der Prämisse «je höher die Reichweite, desto besser» zu verwenden, deren Batterie und Reichweite nur so gross ist wie für den Betrieb notwendig.

Bei den hohen Nutzlastverlusten, die sich bei BEV ergeben, wird offensichtlich, dass elektrische Lkw, die ihren Strom aus einem Oberleitungsnetz beziehen und dadurch nur eine deutlich kleinere Batterie benötigen, unter Umständen eine ernst zu nehmende Alternative sind. Das Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung begleitet ein Projekt einer Pilotstrecke für Oberleitungs-Lkw im Murgtal (Fraunhofer ISI, 2017).

Hinsichtlich der Reichweite schneiden BEV je nach Fahrzeug am schlechtesten ab: So hat der BEV-Lkw von Scania gerade einmal eine Reichweite von 250km (Scania, 2020). Etwas grösser ist die Reichweite von FCEV: Diese liegt bei 300-400km (Gnann et al., 2017, S.4). Hier ist allerdings zu berücksichtigen, dass sich diese Reichweite auf ein Tankvolumen bezieht, dass dem eines Diesel-Lkws entspricht. Die Reichweite von FCEV wird in den Spinnendiagrammen höher angesetzt als die von CNG, weil die Recherchen langfristige Einsatzfelder von FCEV für grosse Reichweiten ergaben. Ausserdem zeigt sich beim Vergleich von Pkw, die hinsichtlich neuer Antriebstechnologien schon ausgereifter sind, dass FCEV eine grössere Reichweite als CNG haben (ADAC, 2018). CNG-Lkw haben eine Reichweite von bis zu 500km. LNG-Lkw können Strecken von bis zu 1'100km zurücklegen, ohne zu tanken (Scania, 2020a). Die Antriebstechnologie mit der höchsten Reichweite bleibt allerdings dennoch der Diesel mit einer Reichweite von bis zu 2500km (BMVI, 2017).

Vergleicht man die Werte für die Reichweiten mit denen der Nutzlast, so fällt auf, dass die Gegenüberstellungen, die hinsichtlich der Nutzlast gefunden wurden, sich mit denen der Reichweite decken. Es gilt also: Je grösser die Reichweite einer Antriebstechnologie, desto grösser ihre Nutzlast. Innerhalb einer Antriebstechnologie gilt hingegen: Je grösser die Reichweite, desto geringer die Nutzlast. Mehr Reichweite kann mit mehr Eigengewicht umgesetzt werden. Dadurch verringert sich die Nutzlast.

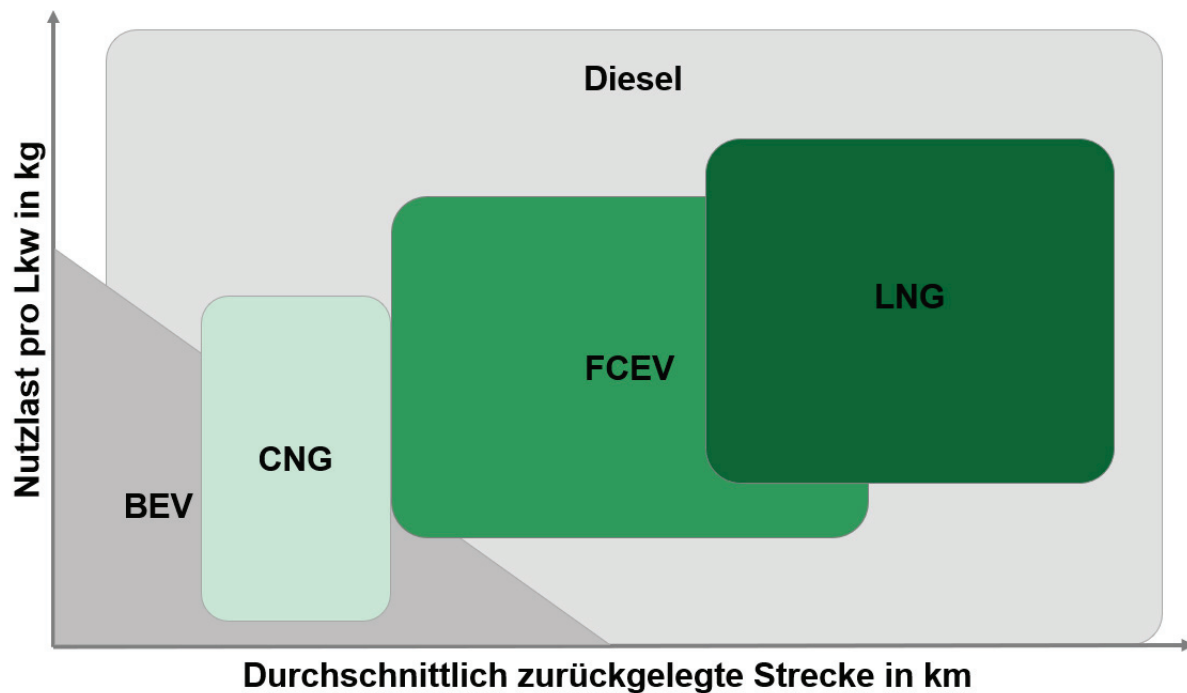


Abbildung 22: Eignungsprofil der Antriebstechnologien hinsichtlich Reichweite und Nutzlast (eigene Darstellung)

Um die Umsetzbarkeit einer Antriebstechnologie zu bewerten, werden folgende Unterkriterien gewählt: technologische Reife der Antriebstechnologie, Angebot an Fahrzeugen mit der Antriebstechnologie, Skalierbarkeit der Antriebstechnologie und Ausbau der Infrastruktur. Die Bewertung der Kriterien orientiert sich dabei stark an der deutschen Energieagentur (Deutsche Energie-Agentur, 2018). Diesel ist eine technologisch ausgereifte Technologie, für die ein grosses Angebot auf dem Markt vorhanden ist. Aufgrund der noch hohen verfügbaren Vorkommen an Erdöl ist die Skalierbarkeit weiterhin sehr hoch, die Infrastruktur für Diesel-Tankstellen ist sehr gut ausgebaut. Deswegen wird die Umsetzbarkeit von Diesel als sehr hoch bewertet. CNG ist ebenfalls eine Antriebstechnologie mit einer hohen Reife. Das Angebot an schweren CNG-Lkw ist nicht so hoch wie das von LNG-Lkw. Die Skalierbarkeit ist aufgrund der noch sehr hohen Fördermengen sehr hoch. Es existiert eine flächendeckende Infrastruktur, die aber deutlich dünner ist als etwa die von Diesel. Deshalb wird die Umsetzbarkeit von CNG als mittelhoch bewertet. Die Umsetzbarkeit von LNG wird ebenfalls als mittelhoch bewertet. Zwar ist die Tankstellen-Infrastruktur deutlich schlechter



ausgebaut, dafür existieren allerdings mehr Angebote für schwere Nutzfahrzeuge auf dem Markt. BEV-Lkw befinden sich noch im Prototypenstadium, die Technologiereife liegt also unter der von CNG und LNG, das Angebot auf dem Markt ist somit auch deutlich kleiner. Skalierbarkeitsprobleme existieren nur in geringem Masse (temporäre Rohstoffknappheit z.B. Kobalt). Die Ladeinfrastruktur befindet sich hingegen noch im Aufbau. Die Umsetzbarkeit von BEV wird deswegen als mittel bis tief bewertet. Die Technologiereife von FCEV ist derzeit sehr gering. Es gibt bislang kaum Angebote für Brennstoffzellen-Lkw. Die Skalierbarkeit der Antriebstechnologie ist hoch. Ein Nachteil ist der hohe Energiebedarf der Antriebstechnologie durch den geringen Wirkungsgrad. Die Infrastruktur für FCEV existiert bisher kaum. Die Umsetzbarkeit von FCEV wird daher als gering bewertet. Biodiesel ist technologisch nicht so ausgereift wie Diesel. So sind zum Beispiel Biokraftstoffe, die 100%ig in klassische Dieselmotoren beigemischt werden können, noch sehr jung (Bioökonomie, 2017). Auf der anderen Seite sind allerdings auch Motoren zu erwähnen, die reinen Biodiesel tanken können (Biofuel Express, 2021). Die Skalierbarkeit von Biodiesel ist sehr gering (vgl. Exkurs Skalierbarkeit von Biodiesel): Die Menge an herstellbarem Biodiesel aus Abfällen liegt bei einem Bruchteil des Dieselbedarfs, den der Strassengüterverkehr benötigt. Eine öffentliche Infrastruktur für reinen Biodiesel existiert nicht. Dieser muss an eigenen Tankstellen getankt werden. Die Umsetzbarkeit von Biodiesel wird daher als mittel bis tief bewertet.

In Spinnendiagrammen werden die Ergebnisse veranschaulicht. Dabei ist ein Wert umso weiter aussen, je «besser» er ist, also für Kosten, je günstiger, für die CO₂-Emissionen, je geringer, für Nutzlast, Reichweite und Umsetzbarkeit, je grösser.

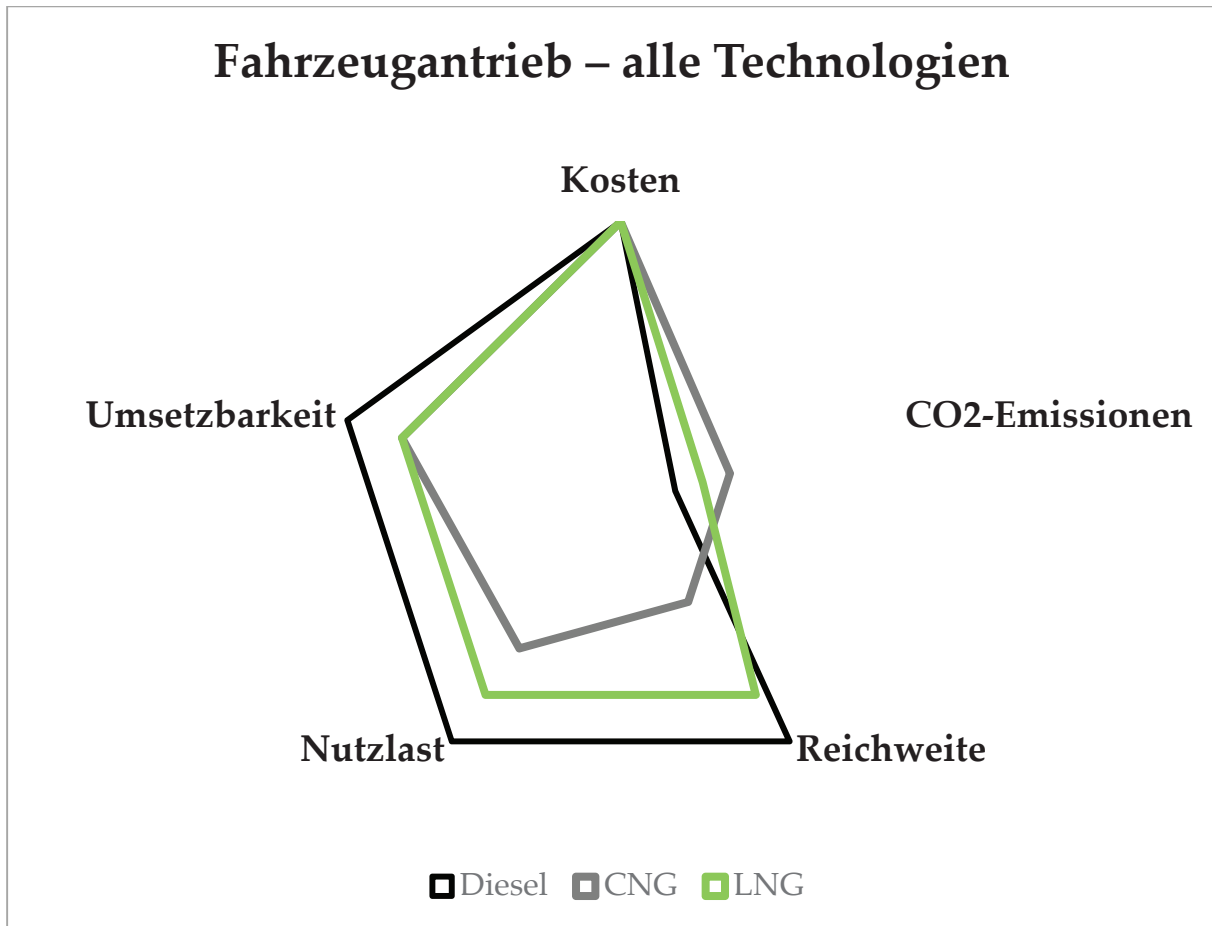


Abbildung 23: Spinnendiagramm der Antriebstechnologien Diesel, CNG und LNG (eigene Darstellung)

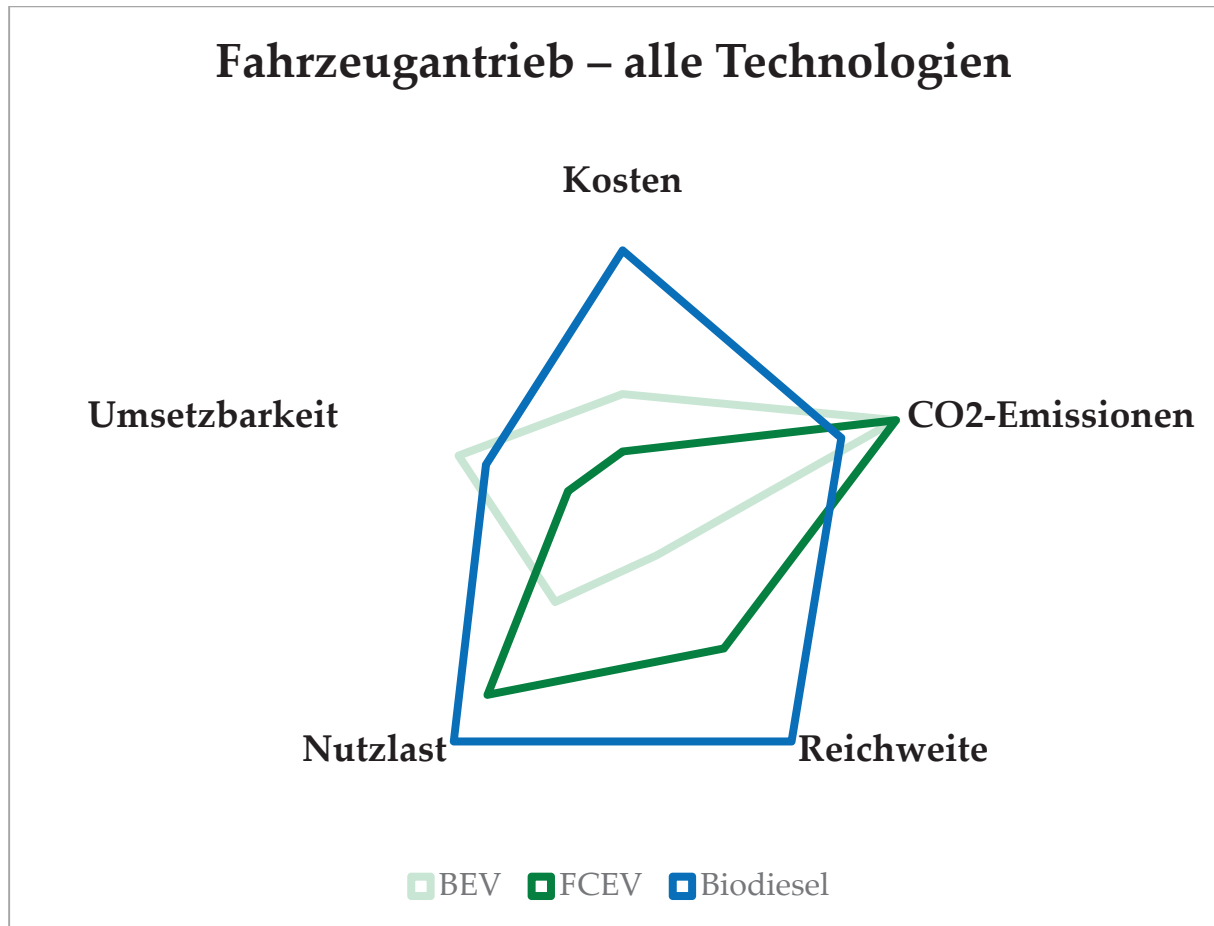


Abbildung 24: Spinnendiagramm der Antriebstechnologien BEV, FCEV und Biodiesel (eigene Darstellung)

Eine wesentliche Erkenntnis aus den Spinnendiagrammen ist, dass keine Antriebstechnologie von einer anderen Antriebstechnologie dominiert wird, d.h., es gibt keine Antriebstechnologie, die in jeder Kategorie besser abschneidet als eine andere. Keine Antriebstechnologie kann also durch eine andere ersetzt werden, ohne dass daraus Nachteile in mindestens einer Kategorie entstehen.

Exkurs: Weitere Nachhaltigkeitsparameter am Beispiel Wasserverbrauch

Bei der Herstellung von Batterien wird viel Wasser verbraucht. In diesem Exkurs wird untersucht, wie hoch dieser Wasserverbrauch im Vergleich zu anderen Gütern ist. Bei der Herstellung einer 64-kWh-Batterie (für Pkw) werden 3'840 Liter Wasser verdunstet. Dies entspricht dem Wasserverbrauch von 250 Gramm Rindfleisch, 10 Avocados oder 30 Tassen Kaffee. Für eine Lkw-Batterie mit einer Kapazität von 240 kWh ergibt sich ein Wasserverbrauch von 14'400 Litern Wasser. Dies entspricht dem Wasserverbrauch von 41 Avocados, 1'125 Gramm Rindfleisch oder 131 Tassen Kaffee. Hinzu kommt beim Vergleich des Wasserverbrauchs mit Erdöl, dass dieses zunehmend unkonventionell gefördert wird, wodurch der Wasserverbrauch steigt (Tartler, 2019).

7 Vergleich aller Massnahmen

7.1 Kombinierte Betrachtung von CO₂-Einsparungspotenzial und Kosten

In der Abbildung 25 werden das CO₂-Einsparungspotenzial und die jeweilige Wirtschaftlichkeit aller in der Studie untersuchten Massnahmen dargestellt. Die Wirtschaftlichkeit wird dabei in einen rentablen und nichtrentablen Sektor aufgeteilt.

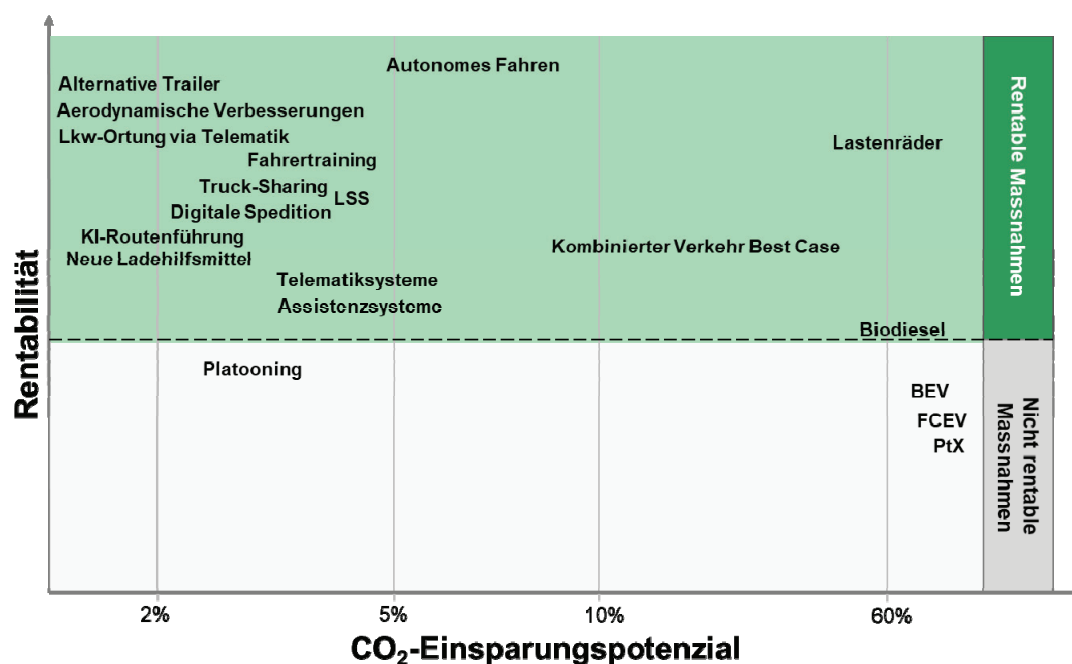


Abbildung 25: CO₂-Einsparungen und Wirtschaftlichkeit aller untersuchten Massnahmen (eigene Darstellung)

Ein Grossteil der Massnahmen ist zwar wirtschaftlich rentabel, bewirkt allerdings nur geringfügige CO₂-Einsparungen im Gesamtkontext («low hanging fruits»). Hohe CO₂-Einsparungen resultieren bisher nur aus einigen wenigen marktreifen Massnahmen, welche zumeist nur in Ausnahmefällen bereits wirtschaftlich umgesetzt werden können (alternative Antriebe wie bspw. BEV und FCEV). Beim Konzept des Kombinierten Verkehrs (KV) spielt beispielsweise die Art und Weise der Implementierung eine entscheidende Rolle, da sich lediglich nennenswerte CO₂-Einsparungen erzielen lassen, wenn insbesondere der Vor- und Nachlauf mit geringem Aufwand abgewickelt werden kann. Darüber hinaus spielen die geografische Lage und die Anbindung der Umschlagterminals eine entscheidende Rolle. Ein erfolgreich umgesetztes Praxisbeispiel des KV verkehrt auf der Strecke zwischen Lille – Avignon: Durch KV lassen sich hierbei mehr als 20% der CO₂-Emissionen gegenüber eines reinen Strassengüterverkehrs einsparen (Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (IEU) & Studiengesellschaft für den kombinierten Verkehr (SGKV), 2002). Sowohl Lille als auch Avignon sind an das Schienennetz angeschlossen. Der Vor- und Nachlauf der Waren per



Lkw macht daher nur noch einen minimalen Anteil am Gesamttransport aus. Die Verbindung von Lille nach Avignon über die Schiene verläuft darüber hinaus ohne nennenswerte Umwege.

Mithilfe von Lastenrädern lassen sich beispielsweise ebenfalls hohe prozentuale CO₂-Einsparungen erzielen. Das Einsatzfeld von Lastenrädern beschränkt sich allerdings nahezu ausschliesslich auf die letzte Meile und gewichtsarme Güter.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass viele Emissionsreduktions-Massnahmen im Strassengüterverkehr aktuell bereits wirtschaftlich rentabel sind, dabei allerdings oftmals nur ein geringes prozentuales CO₂-Einsparungspotenzial realisieren. Eine Transformation hin zu einem zunehmend dekarbonisiertem Strassengüterverkehr ist nach wie vor mit wirtschaftlich hohen Kosten verbunden.

Als Orientierung für etwaige Umsetzungen von CO₂-Einsparmassnahmen in der Praxis werden die einzelnen Massnahmen hinsichtlich der Kriterien Zeithorizont und Verbreitungsumfang klassifiziert und aufgezeigt (s. Abbildung 26). In Hinblick auf den Zeithorizont wird unterschieden, ob die Massnahmen bereits heute umsetzbar sind oder ob die Massnahmen erst in einiger Zukunft umsetzbar sein werden, was hinsichtlich der Orientierung zur Folge hat, dass deren Entwicklung zunächst beobachtet werden sollte. Der Verbreitungsumfang unterscheidet, ob Unternehmen eine Massnahme im intraorganisatorischen Kontext (sprich «intern») umsetzen können oder ob unternehmensübergreifende Kooperationen mit anderen Stakeholdern für die Umsetzung notwendig sind.

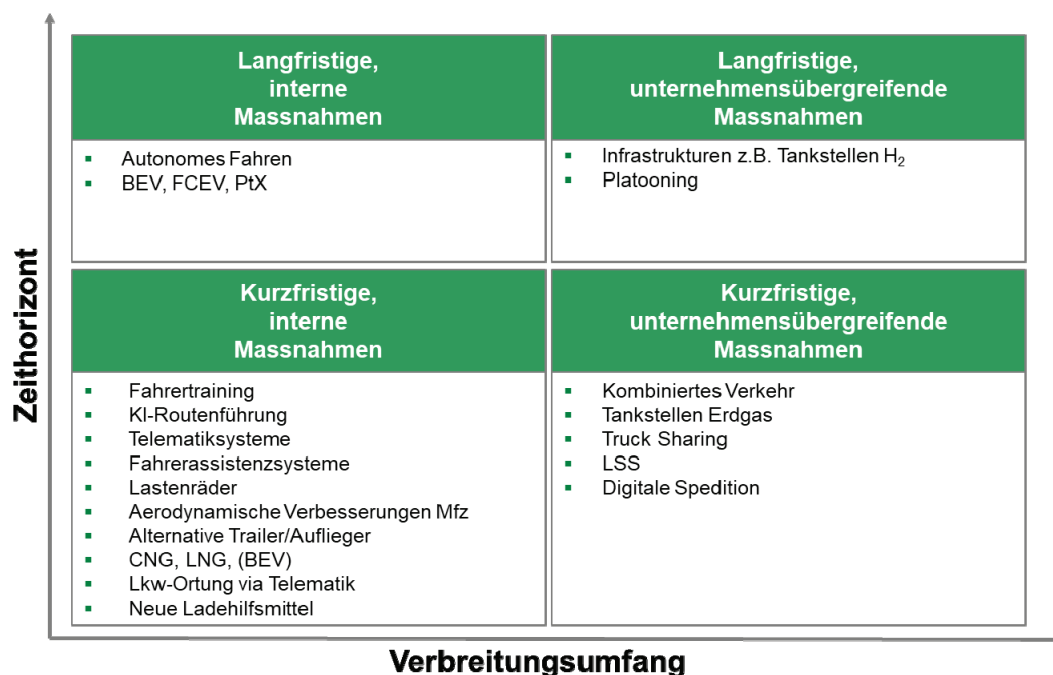


Abbildung 26: Empfehlungscluster zur Umsetzung der Massnahmen (eigene Darstellung)



8 Schlussbetrachtung

Der aufzuzeigende Forschungsbedarf bezieht sich sowohl auf deskriptive Forschung (Untersuchung der Höhe von CO₂-Emissionen) als auch auf vorhandenen Entwicklungsbedarf bspw. bei alternativen Antriebstechnologien. Abschliessend werden Limitationen dieser Studie genannt und ein inhaltlicher Ausblick aufgezeigt.

8.1 Implikationen für Forschung und Praxis

Für Praktiker zeigen die Ergebnisse der Studie, dass sich viele unterschiedliche Massnahmen mit einem geringfügigen CO₂-Einsparungspotenzial im Strassengüterverkehr und einem überschaubaren zeitlichen und wirtschaftlichen Aufwand umsetzen lassen. Für sehr hohe CO₂-Einsparungen durch einzelne Massnahmen müssen allerdings bestimmte individuelle Entwicklungen abgewartet werden, bevor tiefgreifende Umsetzungen ergriffen werden können/sollten. Die unsicheren Entwicklungen beziehen sich sowohl auf technologische als auch rechtliche Aspekte. In Hinblick auf technologische Aspekte ist entscheidend, wie viel günstiger alternative Antriebe und ihre Bestandteile in Zukunft sein werden, wenn diese bspw. in Serie produziert werden (insbesondere Komponenten wie Akkus und Brennstoffzellen-Module bei BEV und FCEV sowie die Kostenentwicklung synthetischer Kraftstoffe). Ausserdem wird der länderspezifische Ausbau an erneuerbaren Energien einen grossen Einfluss auf die Wahl der Antriebstechnologie haben. Hier stellt sich die Frage, ob genügend erneuerbare Energien zur Verfügung stehen werden, um die Nachfrage von bspw. grünem Wasserstoff für FCEV oder Biogas für Power-to-X, verschärft durch die geringen energetischen Wirkungsgrade der Technologien, in einer möglichen Umsetzung ausreichend (d.h. flächendeckend skalierbar) decken zu können. Aber auch für technologisch ausgereifere Technologien bestehen Unsicherheiten. So muss z.B. geklärt werden, inwiefern sich Oberleitungs-Lkw, die aufgrund der benötigten kleineren Batterie als technologisch reifer einzuschätzen sind, im Strassengüterverkehr einsetzen lassen und inwiefern ein möglicher Einsatz einen Ausbau der erforderlichen Infrastruktur rechtfertigt. Rechtliche Unsicherheiten, die einen grossen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Antriebstechnologie haben, sind vor allem Mautbefreiungen bzw. Steuerbefreiungen. In der Schweiz wird die Zukunft von BEV und FCEV stark davon abhängen, wie lange diese noch von der LSVA befreit sein werden. Aber auch in Deutschland und Österreich wird die Frage, wie lange alternative Antriebe keine bzw. eine geringere Maut zahlen werden, einen nicht unwesentlichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und damit langfristig auf eine umfassende Umsetzung haben. In Deutschland und Österreich werden Regeln zu Mautbefreiungen von der EU mitbestimmt.



Die Schweiz ist hingegen in ihren Entscheidungen hinsichtlich LSVA-Befreiungen autark. Neben der Mautbefreiung ist ebenfalls unsicher, wie lange die Anschaffung alternativer Antriebe noch gefördert und wie genau die jeweilige CO₂-Steuer sich in den Ländern entwickeln werden. Die rechtlichen Unsicherheiten beziehen sich allerdings nicht nur auf die alternativen Antriebe, sondern auch auf die sonstigen Massnahmen: Hier besteht Klärungsbedarf im Hinblick auf Haftungsfragen (z.B. bei LSS) oder Vorgaben (z.B. für den einzuhaltenden Mindestabstand beim Fahren in einem Platoon).

Der identifizierte Forschungsbedarf zeigt mehrere Pfade auf. Zum einen existiert deskriptiver Forschungsbedarf wie etwa eine genauere Untersuchung der CO₂-Emissionen in den Lebenszyklusphasen Infrastruktur und Entsorgung/Recycling. Daneben besteht Forschungsbedarf im Bereich technologische Grundlagen, um alternative Antriebe und sonstige Massnahme wie das autonome Fahren marktreif und insbesondere wirtschaftlicher zu machen (z.B. durch Massenproduktion). Für BEV ist entscheidend, dass Wege gefunden werden, die Batterie günstiger, leistungsdichter und emissionsärmer herzustellen. Hier kommen unter anderem Batterien in Frage, die weniger seltene Rohstoffe benötigen (insbesondere Kobalt) oder gar Batterien, die gänzlich auf andere, häufiger vorkommende Rohstoffe setzen (z.B. Lithium-Schwefel-Batterien). Um die Batterien emissionsärmer herzustellen, sind Verfahren notwendig, die weniger energieintensiv sind, wie z.B. Trockenbeschichtung der Batterieelektroden. Für FCEV ist insbesondere Forschungsbedarf notwendig, um die Kosten für die Brennstoffzelle zu senken. Neben einer Umstellung der Produktion auf Massenfertigung, ist hierbei eine Reduktion seltener Materialien (u.a. Metall Platin) erstrebenswert. Neben der Komponente Brennstoffzelle ist insbesondere die Wasserstoffherstellung (grüner Wasserstoff) per Elektrolyse ein Kostentreiber. Ziel wäre es hier, langfristig klimaneutralen Wasserstoff kostengünstiger als bisher herstellen zu können.

Kurz wurden in dieser Studie die Einsatzfelder der alternativen Antriebe adressiert (z.B. Eignung hinsichtlich der Reichweiten). Hier besteht umfassender Forschungsbedarf, inwiefern sich einzelne Antriebe für bestimmte Einsatzszenarien und -umgebungen eignen.

8.2 Limitationen und Ausblick

Die vorliegende Studie unterliegt einigen Limitationen. Der Umfang der Studie ist zeitlich, geografisch und hinsichtlich der betrachteten Fahrzeuge begrenzt. Die zeitliche Begrenzung liegt darin, dass die Studie eine Momentaufnahme der einzelnen Massnahmen darstellt. Es werden nahezu keine Entwicklungslinien in die Zukunft vorgenommen. So könnten folgende Fragen analysiert werden: Wie werden sich die Batteriepreise in Zukunft entwickeln? Wird es

gelingen, die CO₂-Emissionen bei der Batterieherstellung signifikant zu reduzieren? Wie wird sich der Preis von FCEV entwickeln, wenn diese in Serie gefertigt werden? Wie wird sich der Preis bei der Herstellung von grünem Wasserstoff entwickeln? Die geografische Begrenzung liegt darin, dass nur der DACH-Raum betrachtet wird. Die Ergebnisse dieser Studie lassen sich aufgrund der komplexen und vielseitigen länderspezifischen Einflüsse wie beispielsweise die unterschiedlichen gesetzlichen Rahmenbedingungen nicht auf andere Regionen übertragen. So haben die Höhe der Maut und die Entscheidung, welche Antriebstechnologien Maut-befreit werden, einen grossen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Antriebstechnologien. Aber auch die Höhe der Steuern, die auf Treibstoffe erhoben werden, bzw. die Höhe des Strompreises beeinflussen die TCO ebenso. Nicht nur in den gesetzlichen Faktoren zeigt sich der Einfluss der Wahl des DACH-Raums. So sind die Transportwege für fossile Brennstoffe nach Europa verglichen mit Russland und den USA recht lang. Die längeren Transportwege haben sowohl auf den Preis als auch die Vorkettenemissionen einen Einfluss. Schliesslich wird mit Ausnahme des Kombinierten Verkehrs hier nur der Strassengüterverkehr untersucht. Die CO₂-Effekte von Verkehrsverlagerungen werden nicht untersucht.

Darüber hinaus unterliegen die aufgestellten Rechenkonzepte einigen Ungenauigkeiten. Diese basieren auf studieninternen und -externen Ursachen. Zum einen wurden für die Berechnungen Zahlenwerte anderer Studien und Publikationen und damit deren Annahmen, Vereinfachungen und Ungenauigkeiten übernommen. Hinsichtlich vieler recherchierter Werte wurden in der wissenschaftlichen Literatur stark schwankende Angaben gefunden. Diese Schwankungen wurden in dieser Studie verarbeitet, indem Mittelwerte gebildet bzw. möglichst aktuelle und sich auf das Thema und den Rahmenbedingungen dieser Studie beziehende Zahlenwerte verwendet wurden. In den vorgestellten Ergebnissen werden die Unsicherheiten nicht weitergehend quantitativ berücksichtigt. Die Ungenauigkeiten ergeben sich nicht nur durch die übernommenen Werte, sondern auch aus den getroffenen Annahmen in den erstellten Rechenkonzepten. Hier ist etwa die Entscheidung zu nennen, dass die Lebenszyklusphasen Infrastruktur und Entsorgung/Recycling aufgrund mangelnder Datenlage ausgeklammert wurden. Einen grossen Einfluss hat auch die Annahme, dass unabhängig von der Antriebstechnologie gleiche Einsatzprofile angenommen wurden. Dies hat den Vorteil, dass die Antriebstechnologien sich leicht miteinander vergleichen lassen. Es werden dadurch aber auch wichtige Aspekte vernachlässigt. So wird z.B. nicht berücksichtigt, dass die Einsatzdauer von alternativen Antrieben grösser als die von Diesel-Lkw gewählt werden kann, sodass die höheren Anschaffungskosten mithilfe der niedrigeren Betriebskosten besser



kompensiert werden können. Ebenfalls unberücksichtigt bleibt z.B. ein angepasstes Einsatzprofil hinsichtlich der Reichweite. So wird nicht berücksichtigt, dass längere Wartezeiten zum Aufladen des Fahrzeugs mit gesetzlich vorgeschriebenen Pausenzeiten kombiniert oder geringere Reichweiten von FCEV durch eine dichtere Tankstelleninfrastruktur ausgeglichen werden können. Es fehlt auch eine Abschätzung des Einsparungspotenzials durch das kombinierte Umsetzen mehrerer Massnahmen. So wird z.B. nicht die Frage beantwortet, wie viel CO₂ sich einsparen lässt, wenn alle Massnahmen bis auf die alternativen Antriebe eingeführt werden. Für die Studie wurden Interviews geführt, um die Expertise und Anwendungsumgebungen der Konsortialpartner weitgehend zu berücksichtigen. Daher sind Abweichungen für Anwendungen zu erwarten, die sich stark von denen der Konsortialpartner unterscheiden.

9 Fazit

In dieser Studie wurden Massnahmen zur Reduktion von CO₂-Emissionen im Strassengüterverkehr mit dem Fokus auf die Akteure Flottenbetreiber und Verlagerer zusammengetragen und hinsichtlich ihres CO₂-Einsparungspotenzials sowie ihrer Wirtschaftlichkeit und Umsetzbarkeit betrachtet, analysiert und miteinander verglichen. Eine grundsätzliche Erkenntnis basierend auf den Ergebnissen dieser Studie ist, dass zwei wichtige Kategorien von Massnahmen existieren. Zum einen gibt es eine Vielzahl an Massnahmen, deren Umsetzungen sowohl wirtschaftlich rentabel als auch CO₂-einsparend sind. Allerdings ist das CO₂-Einsparungspotenzial in den meisten Fällen begrenzt. Auch durch eine mögliche Kombination dieser Massnahmen lässt sich nur begrenzt CO₂ einsparen, da diese sich teilweise komplementär zueinander verhalten. Die zweite Art von Massnahmen wird durch die betrachteten alternativen Antriebe verkörpert, mit denen sich hohe CO₂-Einsparungen (allerdings keine CO₂-Neutralität) erreichen lassen. Diese sind allerdings, solange nicht hinreichend gegenüber Diesel subventioniert und bevorteilt, nahezu durchgehend wirtschaftlich unrentabel in der Umsetzung. Neben diesen zwei zentralen Gruppen gibt es weitere Kategorien von Massnahmen. Hier ist der Biodiesel aus Abfällen zu nennen, der wirtschaftlich zum bestehenden Status Quo der Diesel-Fahrzeuge konkurrenzfähig ist und viel CO₂ einspart, dessen Skalierbarkeit allerdings durch die limitierte Verfügbarkeit des Brennstoffs begrenzt ist. Die Massnahme Platooning ist hingegen wirtschaftlich unrentabel und spart darüber hinaus nur geringfügig CO₂ ein.

Aufgrund der Tatsache, dass alternative Antriebe nicht hinreichend rentabel sind und das Marktangebot begrenzt ausfällt, ist zunächst nur eine Anwendung in Form von Pilotprojekten



zu erwarten. Hier scheint es für Flottenbetreiber angebracht, einen schrittweisen Umstieg mit der individuellen Erprobung der Technologien mit Prototypen-Fahrzeugen zu forcieren. Ist bspw. nicht die Nutzlast, sondern das Transportvolumen für ein Einsatzszenario entscheidend, fällt der hauptsächliche Nachteil von BEV (die geringe Nutzlast) nicht ins Gewicht. Die Einsatzplanungen und Technologie-Entscheidungen sind darüber hinaus länderspezifisch vorzunehmen. Während in der Schweiz BEV und FCEV aufgrund der LSVA-Befreiung verhältnismässig attraktiv für die Umsetzung sind, können in Deutschland je nach politischer Entwicklung Lkw mit Gasantrieb eine attraktive Option bleiben. Insbesondere in der Schweiz ist aufgrund der grossen Wirkung der LSVA eine schnelle Verbreitung alternativer Antriebe zu erwarten.

Es bleibt allerdings anzunehmen, dass alternative Antriebe in der Umsetzung auch längerfristig mit höheren Kosten verbunden bleiben werden. Hier gilt es durch Akteure und Politik aktiv Bewusstsein zu schaffen, um bei Verladern und Endkunden Akzeptanz zu schaffen, dass nachhaltige Transporte wirtschaftlich teurer sein dürfen und etwaige Mehrkosten in Kauf genommen werden. Denn wenn Akteure nicht bereit sind, für mehr Nachhaltigkeit auch im Einzelfall etwas höhere Kosten zu akzeptieren, wird ein flächendeckender und dringend benötigter Umstieg auf CO₂-reduzierende Massnahmen im Strassengüterverkehr Wunschdenken bleiben.



10 Literaturverzeichnis

ADAC (2018). *Alternative Antriebe – Reichweitenvergleich*. Abgerufen von: <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/alternative-antriebe/>

ADAC (2020). *Benzin- und Dieselpreis: So entstehen die Spritpreise*. Abgerufen von: <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/tipps-zum-tanken/7-fragen-zum-benzinpreis/>

ADAC (2020a). *Benzinpreise im europäischen Ausland*. Abgerufen von: <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/ausland/spritpreise-ausland/>

ADAC (2020c). *Synthetische Kraftstoffe – Energieträger der Zukunft?* Abgerufen von: <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/synthetische-kraftstoffe/>

Agora Verkehrswende (2018). *Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe*. Abgerufen von: https://www.stiftung-mercator.de/content/uploads/2020/12/Agora_SynCost-Studie_WEB.pdf

Artner (2016). *Das Phantom Strom: Wie viel CO₂-Emissionen entstehen beim Verbrauch von einer kWh Strom?* Abgerufen von: <https://elektrotechnikblog.at/das-phantom-strom-wieviele-co2-emissionen-entstehen-beim-verbrauch-von-einer-kwh-strom/>

Asfinag (2020). *GO-Maut für Fahrzeuge über 3,5 Tonnen*. Abgerufen von: <https://www.asfinag.at/maut-vignette/maut-fuer-lkw-und-bus/>

BAFU. (2018a, 21. August). *Internationale Klimapolitik: Kyoto-Protokoll*. Bundesamt für Umwelt. Abgerufen von: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/fachinformationen/klima--internationales/internationale-klimapolitik--kyoto-protokoll.html>

BAFU. (2018b, 21. August). *Das Übereinkommen von Paris*. Abgerufen von: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/fachinformationen/klima--internationales/das-uebereinkommen-von-paris.html>

BAFU (2018c) *Klimapolitik der Schweiz – Umsetzung des Übereinkommens von Paris*



- BAFU. (2020). Kenngrößen zur Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Schweiz 1990-2018. Abgerufen von: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUK Ewjy0oyM5ZPuAhXD0qQKHVeBBEkQFjAAegQIAxAC&url=https%3A%2F%2Fwww.bafu.admin.ch%2Fdam%2Fbafu%2Fde%2Fdokumente%2Fklima%2Ffachinfo-daten%2Fkenngroessen_thg_emissionen_schweiz.pdf.download.pdf%2FKenngr%25C3%25B6ssen_2020_D.pdf&usg=AOvVaw1S3k_63JZDD8fvA6uzAIea
- Belmer, F., Bensmann, B., Brandt, T., Cremers, C., Derflinger, M., Hanke-Rauschenbach, R., ..., Wolf, E. (2019). Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeuge – Bedeutung für die Elektromobilität. Abgerufen von: <https://www.vde.com/resource/blob/1875246/3a4ac5081799af17650c62316c183eb4/studie-brennstoffzelle-data.pdf>
- Berger, M., Pfister, S., Bach, V. & Finkbeiner, M. (2015). Saving the Planet's Climate or Water Resources? The Trade-Off between Carbon and Water Footprints of European Biofuels. Sustainability, 7(6) 6665-6683 <https://doi.org/10.3390/su7066665>
- Biofuels Express (2021). Scania adds 12-litre biodiesel engines to its Euro 6 range. Abgerufen von: <https://www.biofuel-express.com/en/scania-adds-13-litre-biodiesel-engines-to-its-euro-6-range/>
- Biofuels Schweiz (2013). *Beschreibung für Projekte zur Emissionsminderung in der Schweiz*
- Bioökonomie (2017). Unverdünnter Biodiesel für Motoren geeignet. Abgerufen von: <https://biooekonomie.de/nachrichten/neues-aus-der-biooekonomie/unverduennter-biodiesel-fuer-motoren-geeignet>
- BMK. (2020). Prognose für den Güterverkehr bis 2025. Abgerufen von: https://www.bmk.gv.at/themen/verkehrsplanung/gvp/grafiken/personen_gueter_unfaelle.html
- BMU (2020). *Klimaschutz in Zahlen*. Abgerufen von: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pools/Broschueren/klimaschutz_zahlen_2020_broschuere_bf.pdf
- Bremen, P. (2010). Total Cost of Ownership – Kostenanalyse bei der globalen Beschaffung direkter Güter in produzierenden Unternehmen (Dissertation ETH Zürich)



- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2017). *Brennstoffzellen-Lkw: kritische Entwicklungshemmnisse, Forschungsbedarf und Marktpotenzial*. Abgerufen von: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/MKS/teilstudie-brennstoffzellen-lkw.html>
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2019). Lkw-Maut. Abgerufen von: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/StV/Strassenverkehr/lkw-maut.html>
- Bundesnetzagentur (2019). *Monitoringbericht 2019*. Abgerufen von: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Berichte/2019/Monitoringbericht_Energie2019.pdf?__blob=publicationFile&v=5
- BFS. (2019). Güterverkehr in der Schweiz 2018. Abgerufen von: <https://www.bfs.admin.ch/bfsstatic/dam/assets/350058/master>
- Brunner, F., Iten, T. (2020). Umweltbelastung aus der Stromproduktion der vier grössten Schweizer Stromversorger 2019. Abgerufen von: https://www.energiestiftung.ch/files/energiestiftung/publikationen/pdf/20200717_Kurzstudie_Strommix_2019.pdf
- Bundesamt für Energie (2018). *Energieetikette für Personenwagen: Umweltkennwerte 2018 der Strom- und Treibstoffherstellung*
- Bundesamt für Energie (2020). *Emissionsfaktoren fossiler Brennstoffe*. Abgerufen von: https://www.ge.ch/statistique/tel/domaines/08/08_03/facteurs_conversion.pdf
- Bundesamt für Energie (2020a). *Energiekette für Personenwagen: Umweltkennwerte 2018 der Strom- und Treibstoffbereitstellung*.
- Bünger, Landinger, Weindorf, Wurster, Zerhusen & Zittel (2016). Vergleich von CNG und LNG zum Einsatz im Fernverkehr. Angerufen von: http://www.lbst.de/ressources/docs2016/1605_CNG_LNG_Endbericht_public.pdf
- Bussgeldkatalog (2020). *Zuladung beim Lkw: Was dürfen Sie transportieren?*. Abgerufen von: <https://www.bussgeldkatalog.org/zuladung-lkw/>
- Caprez, C. & Bachmann, F. (2019). Mit Frittieröl die Bilanz schmieren. Die Wochenzeitung. Abgerufen von: <https://www.woz.ch/-a2d2>



Comparis (2020). Mercedes-Benz Sprinter Neuwagen. Abgerufen von:
<https://www.comparis.ch/carfinder/marktplatz/mercedes-benz/sprinter/neuwagen>

Deutsche Energie-Agentur (2018). Schwerlaststraßenverkehr – Einsatzgebiete für Power Fuels. Abgerufen von:
https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/607/9264_Schwerlaststrassenverkehr.pdf

Dobschütz, L., Barth, M., Jäger-Goy, H., Kütz, M. & Möller, H. (2000). *IV-Controlling* (1.Auflage). Wiesbaden. Gabler Verlag

ecomento (2019). Österreich gibt weitere Millionen für E-Mobilität frei. Abgerufen von:
<https://ecomento.de/2019/01/07/oesterreich-elektroauto-elektromobilitaet-foerderung-2019-2020/>

Eidgenössische Zollverwaltung (2017). LSVA – Allgemeines / Tarife. Abgerufen von:
<https://www.ezv.admin.ch/ezv/de/home/information-firmen/transport--reisedokument--strassenabgaben/schwerverkehrsabgaben--lsva-und-psva-/lsva---allgemeines---tarife.html>

European Comission DG Ener (2015). Study on actual GHG data for Diesel, Petrol, Kerosene and Natural Gas (Final Report). Abgerufen von:
<https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/Study%20on%20Actual%20GHG%20Data%20Oil%20Gas%20Final%20Report.pdf>

Finke, C. (2020). Hier lässt sich Wasserstoff tanken. Abgerufen von:
<https://www.autozeitung.de/wasserstofftankstellen-karte-kosten-197731.html>

Fischer, A., Zeilinger, K. (2020). Projekt H2Ö. auto touring. Abgerufen von:
<https://www.oeamtc.at/autotouring/auto/projekt-h2oe-21453690>

Fraunhofer ISI (2017). Wissenschaftliche Begleitung der Pilotstrecke für Oberleitungs-Lkw im Murgtal. Abgerufen von: <https://www.isi.fraunhofer.de/de/presse/2017/presseinfo-22-2017-oberleitungs-lkw-teststrecke-begleitforschung.html>

Fraunhofer IWS (2020). Graphit statt Gold: Dünne Schichten für bessere Wasserstoff-Autos. Abgerufen von:



https://www.iws.fraunhofer.de/de/newsundmedien/presseinformationen/2020/presseinformation_2020-09.html

Frischknecht, R., Itten, R. & Flury, K. (2012): Treibhausgas-Emissionen der Schweizer Strommixe.

Frontier economics (2020). *Der Effizienzbegriff in der klimapolitischen Debatte zum Strassenverkehr*. Abgerufen von: https://www.frontier-economics.com/media/4297/rpt-frontier-uniti_mwv_effizienz-antriebssysteme_26-10-2020-stc.pdf

Ganser, D. & Reinhardt, E. (2008). Erdölknappheit und Mobilität in der Schweiz. Abgerufen von: https://www.agvsbsbl.ch/sites/default/files/global_files/20080800_aw_bericht_erdoelknappheit_d.pdf

Ge, M. & Friedrich, J. (2020, 6. Februar). 4 Charts Explain Greenhouse Gas Emissions by Countries and Sectors. *World Resource Institute*. Abgerufen von: <https://www.wri.org/blog/2020/02/greenhouse-gas-emissions-by-country-sector>

gibgas (2020). CNG-Tankstellen in Europa. Abgerufen von: <https://www.gibgas.de/Tankstellen/Europainfos/%C3%96sterreich>

Gläser, J. & Laudel, G. (2010). *Experteninterviews und qualitative Inhaltsanalyse als Instrumente rekonstruierender Untersuchungen*. (4. Auflage). Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.

GlobalpetrolPrices.com (2020). Schweiz Dieselpreise, abgerufen von: https://de.globalpetrolprices.com/Switzerland/diesel_prices/

Gnann, T., Wietschel, M., Kühn, A., Sauer, A., Plötz, P., Moll, C., ..., Paufler-Mann, D. (2017): Teilstudie «Brennstoffzellen-Lkw: kritische Entwicklungshemmnisse, Forschungsbedarf und Marktpotenzial». Abgerufen von: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/MKS/teilstudie-brennstoffzellen-lkw.pdf?__blob=publicationFile

Graf, M. (2018). LNG zu 1,15 Franken pro Kilogramm. Abgerufen von: <https://www.energate-messenger.ch/news/185347/lng-zu-1-15-franken-pro-kilogramm>



Greenpeace (2020). Blauer Wasserstoff. Lösung oder Problem der Energiewende?

Greenpeace (2014). *Biosprit – Der falsche Weg*. Abgerufen von: <https://www.greenpeace.de/themen/landwirtschaft/biosprit>

Gregori, G. & Wimmer, T. (2011). Grünbuch der nachhaltigen Logistik: Handbuch für die ressourcenschonende Gestaltung logistischer Prozesse. Bundesvereinigung Logistik.

Gruppe Grosser Stromkunden (2019). Vergleich Industriestrompreis. Abgerufen von: <https://stromkunden.ch/?p=410>

Hacker, F., Blanc, R., Görz, W., Bernecker, T., Speiser, J., Röckle, F., ..., Neubauer, G. (2020). Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge. Abgerufen von: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratON-O-Lkw-Endbericht.pdf>

Hall & Latsey (2018). *Effects of battery manufacturing on electric vehicle life-cycle greenhouse gas emissions*. Abgerufen von: <https://theicct.org/publications/EV-battery-manufacturing-emissions>

Höller (2020). Hoeller Electrolyzer verspricht: «Preis von grünem Wasserstoff wird unter 4 Euro/kg liegen». Abgerufen von: <https://www.elektroauto-news.net/2020/hoeller-electrolyzer-preis-gruener-wasserstoff-unter-4-euro-kg>

Horvath&Partners (2019). Entwicklung Batteriekosten seit 2016. Abgerufen von: https://www.horvath-partners.com/fileadmin/horvath-partners.com/assets/05_Media_Center/PDFs/Infografiken/191009_Infografik_Fakteneck_E-Mobilitaet_g.pdf

Hütten, F. & Landwehr, S. (2020). Mautbefreiung in Deutschland wackelt. DVZ. Abgerufen von: <https://www.dvz.de/rubriken/politik/detail/news/mautbefreiung-in-deutschland-wackelt.html>

IEA. (2000). The Road from Kyoto: Current CO₂ and Transport Policies in the IEA. OECD Publishing

IFEU, SGKV (2002). *Vergleichende Analyse von Energieverbrauch und CO₂-Emissionen im Straßengüterverkehr und Kombiniertem Verkehr Straße/Schiene*. Abgerufen von: <https://www.bgl-ev.de/images/daten/emissionen/vergleich.pdf>



- Kühnel, S., Hacker, F. & Görz, W. (2018). Oberleitungs-Lkw im Kontext weiterer Antriebs- und Energieversorgungsoptionen für den Straßengüterverkehr
- Kwade, A. & Jess, L. (2020). Ergebnisbericht Kompetenzcluster ProZell. Abgerufen von: https://www.werkstofftechnologien.de/fileadmin/media/Batterieseite/PDF/Ergebnis_Bericht_ProZell.pdf
- Landwehr, S. (2021). Flottenerneuerungsprogramm für Lkw veröffentlicht. DVZ. Abgerufen von: <https://www.dvz.de/rubriken/politik/detail/news/flottenerneuerungsprogramm-fuer-lkw-veroeffentlicht.html>
- Lattermann, Y. (2016). Total Cost of Ownership Analyse sowie kostenorientierte Optimierung entlang der Supply Chain – dargestellt am Beispiel der Einführung neuer Transportmittel für überlange Bauteile bei der Siemens Healthcare GmbH in Kemnath. Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaft. Abgerufen von: https://opus.ostfalia.de/frontdoor/deliver/index/docId/484/file/Lattermann_2016_Cost+of+Ownership+Analyse.pdf
- Meier, B. (2014). Heiz- und Brennwerte. Abgerufen von: https://www.iet.hsr.ch/fileadmin/user_upload/iet.hsr.ch/Power-to-Gas/Kurzberichte/10_Heiz-_und_Brennwerte.pdf
- Memmler, M., Lauf, T. & Schneider, S. (2018). Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger. Abgerufen von: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-10-22_climate-change_23-2018_emissionsbilanz_erneuerbarer_energien_2017_fin.pdf
- Messmer, A., Frischknecht, R. (2016). Umweltbilanz Strommix Schweiz 2014. Abgerufen von: https://treeze.ch/fileadmin/user_upload/downloads/589-Umweltbilanz-Strommix-Schweiz-2014-v3.0.pdf
- Möckli (2020). Benzin-Preis-Vergleich Schweiz. Abgerufen von: <https://www.benzinpreis.ch/impressum>
- Kraftfahrtbundesamt (2020): *Fahrzeugzulassungen (FZ) Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen.* Abgerufen von: https://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2020/fz13_



2020_pdf.pdf;jsessionid=6D71216335F9DDECE48FF7BC7CB21905.live21301?__blob=publicationFile&v=6

KBA. (2019). Fahrzeugzulassungen (FZ): Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umweltmerkmalen. Abgerufen von:

https://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2019/fz13_2019_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=10

Lichtblau, G., Pölz, W., Stix, S., Winter, R. (2012). Ökobilanzen ausgewählter Biotreibstoffe. Abgerufen von:

<https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0360.pdf>

Österreichs Energie (2020). Strompreis. Abgerufen von: <https://oesterreichsenergie.at/strompreis.html>

Priddle, R. (2000). Foreword. In IEA, The Road from Kyoto: Current CO₂ and Transport Policies in the IEA. OECD Publishing

Punkt4Info (2020). Energieversorger wollen sauberes Gas im Norden erzeugen. Abgerufen von: <https://punkt4.info/die-ausgaben/details/news/energieversorger-wollen-sauberes-gas-im-norden-erzeugen/punkt4-edition-name/swiss-export-news/punkt4-edition-section/15950.html>

Randelhoff (2020). *Batterieelektrisch vs. Brennstoffzelle (H₂) vs. Power-to-X im Strassenverkehr: Energieeffizienz, Wirkung auf das Energiesystem, Infrastruktur, Kosten und Ressourcen.* Abgerufen von: <https://www.zukunft-mobilitaet.net/169895/analyse/elektroauto-brennstoffzelle-synthetische-kraftstoffe-ptx-ptl-kosten-infrastruktur-rohstoffe-energiebedarf-wirkungsgrad/>

Rat der Europäischen Union (1996). Richtlinie des Rats vom 25. Juli 1996 zur Festlegung der höchstzulässigen Abmessungen für bestimmte Strassenfahrzeuge im innerstaatlichen und grenzüberschreitenden Verkehr in der Gemeinschaft sowie zur Festlegung der höchstzulässigen Gewichte im grenzüberschreitenden Verkehr. Abgerufen von: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:01996L0053-20150526&from=EN>

Regierungsprogramm 2020-2024 (2020). Klimaschutz, Infrastruktur, Umwelt & Landwirtschaft



- RolandBerger (2017). *Development of Business Cases for Fuel Cells and Hydrogen Applications for Regions and Cities*. Abgerufen von: https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/171121_FCH2JU_Application-Package_WG1_Heavy%20duty%20trucks%20%28ID%202910560%29%20%28ID%202911646%29.pdf
- Rolande (2020). Vorreiter bei sauberem Kraftstoff. Abgerufen von: <https://rolandelng.de/lng-cng-preise/>
- Scania (2020). Scania stellt vollelektrischen Lkw mit 250 km Reichweite vor. Abgerufen von: <https://www.scania.com/ch/de/home/experience-scania/news-and-events/News/archive/2020/09/bev.html>
- Scania (2020b). Praxisinfos zu Gas-Lkw. Abgerufen von: <https://www.scania.com/de/de/home/products-and-services/articles/vorteile-erdgas-lkw.html>
- Schmied, Wüthrich, Zah, Althaus und Friedl (2015). *Postfossile Energieversorgungsoptionen für einen treibhausgasneutralen Verkehr im Jahr 2050: Eine verkehrsträgerübergreifende Bewertung*. Abgerufen von: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_30_2015_postfossile_energieversorgungsoptionen.pdf
- Schneider, S. (2014). Effizienz- und Wirtschaftlichkeitsanalyse des elektrischen Lastwagens E-Force von Feldschlösschen Getränke AG. Abgerufen von: <https://feldschloesschen.swiss/media/24740/vergleichsstudie.pdf>
- Schweizerischer Bundesrat (2013). *Verordnung über technische Anforderungen an Transportmotorwagen und deren Anhänger*. Abgerufen von: <https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/19950158/201301010000/741.412.pdf>
- Schweizer Nationalrat (2018). Investitionssicherheit für E-Lkw. Abgerufen von: <https://www.parlament.ch/de/ratsbetrieb/suche-curia-vista/geschaeft?AffairId=20184075>
- Sternberg, Hank und Hebling (2019). *Erläuterungen der Studie «Treibhausgas-Emissionen für Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge mit Reichweiten über 300 km»* Abgerufen



von:

https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/news/2019/Erlaeuterungen_Studie-THG-Emissionen_ISE.pdf

Sternberg, A., Hank, C. und Hebling, C. (2017a). Treibhausgas-Emissionen für Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge mit Reichweiten über 300 km. Abgerufen von: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/news/2019/ISE_Ergebnisse_Studie_Treibhausgasemissionen.pdf

Stölzle, W. et al. (2015). Vision Mobilität Schweiz 2050. ETH Zürich und Universität St. Gallen.

Swiss eMobility (2020). Fördermassnahmen in der Schweiz. Abgerufen von: <https://www.swiss-emobility.ch/de/elektromobilitaet/Foerdermassnahmen/>

Tartler, J. (2019). Wenn elf Avocados umweltschädlicher als eine E-Auto-Batterie sind. Der Tagesspiegel. Abgerufen von: <https://www.tagesspiegel.de/wirtschaft/tesla-akkus-wenn-elf-avocados-umweltschaedlicher-als-eine-e-auto-batterie-sind/25291904.html>

Thielmann, A., Wietschel, M., Funke, S., Grimm, A., Hetteshimer, T., Langkau, S., ..., Edler, J. (2020). Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf. Abgerufen von: <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2020/Faktencheck-Batterien-fuer-E-Autos.pdf>

Thinkstep, Prognos (2017): *Null-Emissionsfahrzeuge – Vom ökologischen Hoffnungsträger zur ökonomischen Alternative.* Abgerufen von: <https://www.nweurope.eu/media/2663/2017-nfz-studie.pdf>

Tomaszewska, A., Chu, Z., Feng, X., O’Kane, S., Liu, X., Chen, J., Wu, Billy (2019). Lithium-ion battery fast charging: A review. eTransportation, 1(100011) <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2019.100011>

Tutt, C. (2019). Wo CO₂ bereits richtig Geld kostet. WirtschaftsWoche. Abgerufen von: <https://www.wiwo.de/politik/ausland/kohlendioxid-steuer-wo-co2-bereits-richtig-geld-kostet/24321502.html>



- uba. (2018). Treibhausgas – Bilanz 2018: Daten, Trends & Ausblick. Abgerufen von: https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/aktuelles/2020/treibhausgas_bilanz_2018.pdf
- UBA. (2020a, 1. Oktober). Die Treibhausgase. Abgerufen von: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/die-treibhausgase>
- UBA. (2020b). Energiebedingte Emissionen. Abgerufen von: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energiebedingte-emissionen#energiebedingte-treibhausgas-emissionen>
- uba. (2020c). Klimaschutzbericht 2020: Perspektiven für Umwelt und Gesellschaft. Abgerufen von: <https://www.umweltbundesamt.at/emiberichte>
- UBA. (2020d). Emissionen des Verkehrs. Abgerufen von: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/emissionen-des-verkehrs#minderungsziele-der-bundesregierung>
- Umweltbundesamt (2019). CO₂-Bepreisung in Deutschland. Ein Überblick über die Handlungsoptionen und ihre Vor- und Nachteile. Abgerufen von: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/factsheet_co2-bepreisung_in_deutschland_2019_08_29.pdf
- Umweltbundesamt (2020). *Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990-2019*. Angerufen von: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-04-01_climate-change_13-2020_strommix_2020_fin.pdf
- Umweltbundesamt (2020a). Biokraftstoffe.
- UN. (2021). The Paris Agreement. United Nations. Abgerufen von: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>
- Wietschel et al. (2019). *Klimabilanz, Kosten und Potenziale verschiedener Kraftstoffarten und Antriebssysteme für Pkw und Lkw*. Abgerufen von: <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2019/klimabilanz-kosten-potenziale-antriebe-pkw-lkw.pdf>



- Yang, L., Hao, C., Chai, Y. (2018). Life Cycle Assessment of Commercial Delivery Trucks: Diesel, Plug-In Electric and Battery-Swap Electric. *Sustainability*, 10 (12), 4547
- VDA. (2020). *Verkehr: Das Auto steht in Deutschland für über 80% des Personenverkehrs und ist damit Verkehrsmittel Nummer 1*. Abgerufen von: <https://www.vda.de/de/themen/wirtschaftspolitik-und-infrastruktur/verkehr/gueterverkehr.html>
- Winterhagen, J. (2016). Weniger Teile, weniger Arbeit, weniger Jobs? *Frankfurter Allgemeine Zeitung*. Abgerufen von: https://www.faz.net/aktuell/technik-motor/motor/elektroautos-fordern-hersteller-und-zulieferer-heraus-14547766.html?printPagedArticle=true#pageIndex_3
- Yin, R. K. (2018). *Case Study Research and Applications. Design and Methods*. (Sixth edition). Los Angeles: SAGE.
- Zhao, Burke und Zhu (2013). Analysis of Class 8 Hybrid-Electric Truck Technologies Using Diesel, LNG, Electricity, and Hydrogen, as the Fuel for Various Applications. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers



11 Anhang

11.1 A1: Interviewleitfaden

Generelle Angaben zum Interviewpartner

Name:

Position:

Unternehmen:

Angaben zum Interview

Ort:

Datum, Zeit:

Einverständnis mit Aufzeichnung ja ☐ nein ☐

Vorbemerkung

Die Studie «CO₂-Reduktion im Strassengüterverkehr – Aktuelle und künftige Massnahmen aus der Sicht von Flottenbetreibern und Verladern» beschreibt verschiedene Massnahmen zur CO₂-Reduktion im Bereich des Strassengüterverkehrs. Im Fokusbereich der Studie wird der herkömmliche Dieselantrieb mit verschiedenen alternativen Antrieben hinsichtlich Emissionsausstoss, Wirtschaftlichkeit und Umsetzbarkeit verglichen. Der Emissionsausstoss wird dabei über den gesamten Lebenszyklus einer Technologie analysiert (cradle to grave). Die Wirtschaftlichkeit wird in Form einer Total Cost of Ownership-Betrachtung beleuchtet. Unter den Aspekt der Umsetzbarkeit vereinen sich Variablen wie Technologie-Reifegrad, Infrastruktur und Verbreitung sowie möglich Einsatzumgebungen und Reichweiten der Technologien. Darüber hinaus werden weitere Massnahmen zur CO₂-Reduktion im Strassengüterverkehr aufgezeigt und betrachtet.

Ziel der Befragung

Mithilfe dieses Interviews werden Experteneinschätzungen und individuelle Präferenzen der Konsortialpartner aufgenommen und in die Studie integriert. Thematisch spielen dabei insbesondere Fahrzeugkonfigurationen (als Grundlage für die CO₂-Berechnungen), Total Cost of Ownership-Betrachtungen (Aspekte für Wirtschaftlichkeitsrechnungen) sowie die eigenen Projekte der Konsortialpartner zum Themengebiet CO₂-Reduzierung und deren mögliche Abbildung im Rahmen der Studie eine Rolle.

1. Fahrzeugkonfigurationen für die CO₂-Berechnungen

1.1 Welche Fahrzeuggrössen sind mehrheitlich in Ihrer Firma vertreten? Welche

**Fahrzeugkonfigurationen sind für Sie interessant?**

- Vorschlag für Szenarien: 3,5t; 7,5t; 12t; 40t

1.2 Welche Trailer/Sattelaufleger, Wechselbrücken oder Container-Typen nutzen Sie in Ihrem Unternehmen?

- Konfiguration: Bezeichnung, Achsen, Gewicht

1.3 Wie hoch ist die durchschnittliche Nutzlast Ihrer Fahrzeuge?**1.4 Wie hoch ist der Kraftstoffverbrauch ihrer Fahrzeuge durchschnittlich auf 100 km?**

- Je nach Fahrzeugtyp: 3,5t; 7,5t; 12t; 40t und Einsatzgebiet (Topografie)

1.5 Wie gross ist die Nennleistung der Motoren Ihrer Fahrzeuge?**1.6 Fahrleistung pro Jahr: Wie viele Kilometer fährt ein Fahrzeug in Ihrem Unternehmen durchschnittlich pro Jahr? Wie lange ist die durchschnittliche Einsatzdauer Ihrer Fahrzeuge?**

- Einsatzdauer in Jahren und durchschnittliche Fahrleistung pro Jahr
- Je nach Fahrzeugtyp: 3,5t; 7,5t; 12t; 40t

1.7 Welche Anforderungen hat Ihr Unternehmen bezüglich Leistungsprofilen / Einsatzprofilen von Fahrzeugen?

- Durchschnittlich benötigte Strecken ohne Zwischenstopp (bspw. Ladung Batterien, Wechsel Batterien, Tanken von Wasserstoff und Gas)
- Bestimmte Nutzlasten

1.8 Was geschieht mit Ihren Fahrzeugen am Ende der Einsatzdauer in Ihrem Unternehmen? Wie lange ist diese Einsatzdauer im Durchschnitt?

- Verkauf
- Entsorgung
- Recycling

1.9 Nutzen Sie ausschliesslich Standard- oder auch Spezialfahrzeuge?

- Insbesondere relevant in Hinblick auf die Einsatzdauer

2. Total Cost of Ownership**2.1 Nutzen Sie in Ihrem Unternehmen eine TCO-Berechnung?****2.2 Falls ja, welche Kostenkategorien sind Bestandteile Ihrer TCO-Berechnungen?****2.3 Falls nein, welche Kostenkategorien würden Sie als relevant erachten?**

- Anschaffungskosten
- Kraftstoffpreis in Verbindung mit Kraftstoffverbrauch
- Reparatur/ Wartung und Wartungsintervalle
- Versicherungskosten. Eventuell problematisch bei alternativen Antrieben, da nicht



- vorhanden. Wie sind Ihre Fahrzeuge momentan versichert?
- Verkehrssteuern/Mautgebühren (Bsp. Schweiz: LSVA)
- Subventionierung von Antriebstechnologien

2.4 Nutzen Sie Biodiesel? Falls ja, mit welchen Kosten pro Liter kalkulieren Sie dabei?

3. Mini Cases: Mögliche Piloten und Projekte aus den Unternehmen der Praxispartner

1.1 Warum forcieren Sie in Ihrem Unternehmen Aktivitäten im Bereich der Nachhaltigkeit? Welche Zielvorstellungen verfolgen Sie dabei?

- Subventionen, politische Ziele, Strahlkraft und Marketing
- Verlangen von Kunden nach mehr Nachhaltigkeit

1.2 Welche Projekte hinsichtlich CO₂-Reduktion setzen Sie bereits in Ihrem Unternehmen um? Welche Projekte zur CO₂-Reduktion sind für die nahe Zukunft geplant?

- Möchten Sie, dass Ihr Projekt in Form eines Mini Cases in die Studie miteinfließt?
- Wie sieht die Roadmap ihres Projektes aus (grobe Termine)? Was sind die Meilensteine?
- Was sind Stolpersteine und gibt es Umstände, unter denen Sie das Projekt abbrechen würden? (Bsp. Unzureichende Infrastruktur bei alternativen Antrieben)
- Gibt es Risikofaktoren in Ihrem Projekt? (Sicherheitsaspekte)
- Spielen in Ihren Projekten neben CO₂-Einsparungen auch andere Faktoren der Nachhaltigkeit eine Rolle? (Soziale Aspekte, Wasserbedarf etc.)

1.3 In welchem Kontext verfolgen Sie Ihre Projekte?

- Emissions-Reduzierungen der eigenen Lkw-Flotte
- Bedingungen für mehr Nachhaltigkeit bei Subunternehmern
- Fokus auf nachhaltige Strukturen und Abläufe der gesamten Supply Chain

1.4 Die Betrachtung welcher Antriebstechnologie unserer Studie ist für Sie und Ihr Unternehmen besonders relevant?

- Batteriebetrieben
- Hybrid
- Brennstoffzelle/ Wasserstoff
- CNG
- LNG
- Power-to-X
- Sonstige. Wenn ja, welche

1.5 Welche Themen zur Reduktion von CO₂-Emissionen abseits alternativer Antriebe sind für Sie und Ihr Unternehmen von besonderem Interesse?



11.2 A2: Studieninventar

11.2.1 Alternative Antriebe

FCEV

Titel	Autor/Organisation	Kurzbeschreibung	Stichworte
Potenziale der Wasserstoff- und Brennstoffzellenindustrie in Baden-Württemberg	Roland Berger	Die Studie zeigt auf, wie die Wasserstoff- und Brennstoffzellenindustrie Baden-Württemberg aufgestellt ist und was getan werden könnte und getan werden müsste, um ihre globale Wettbewerbsfähigkeit zu erhalten.	Anwendungsmöglichkeiten Wasserstoff und Brennstoffzellen, Kostenentwicklung, Rahmenbedingungen Marktentwicklung, Herausforderungen Marktentwicklung
Energie der Zukunft? Nachhaltige Mobilität durch Brennstoffzelle und H2	Shell DE in Zusammenarbeit mit dem Wuppertal Institut	Diskutiert Vorkommen, Eigenschaften sowie historische Sichtweisen des Elements Wasserstoff. Es werden Verfahren und Ausgangsstoffe zur Erzeugung von Wasserstoff und die Wasserstoff-Logistik untersucht. Den Schwerpunkt der Studie bilden (auto)mobile Wasserstoffanwendungen	Bereitstellungspfade, Speicherung & Transport von H2, Nutzung, Mobile Anwendungen, Autokosten, Tankstellen-Infrastruktur, Energie- und Umweltbilanzen H2-Szenarien für Pkw
Treibhausgas-Emissionen für Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge mit Reichweiten über 300 km (Inkl. Erläuterungen zur Studie)	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE	Die Studie untersucht den Lebenszyklus-Vergleich von Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeugen bei höheren Reichweiten. Das Resultat: Ab 250 Kilometern seien Pkw mit Wasserstoff und Brennstoffzellen (FCEV) klimafreundlicher als Batteriefahrzeuge (BEV). Der entscheidende Faktor sei die wesentlich grössere CO ₂ -Emission, die durch die Produktion der Batterie entsteht.	Lebenszyklus von Diesel-, Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeug, THG-Emissionen Fahrzeugbetrieb für 2020-2040 (FCEV vs. BEV vs. Diesel) je nach Fahrleistung
Hydrogen scaling up. A sustainable pathway for the global energy transition	Hydrogen Council, McKinsey & Company	Ziel der Studie ist es, das langfristige Potenzial von Wasserstoff aufzuzeigen und eine entsprechende Roadmap vorzustellen.	Vision Wasserstoff, Roadmap, H2 im Transport, Investments und Kosten
Hydrogen meets digital. New opportunities for the energy and mobility system	Hydrogen Council	Dieser Bericht untersucht im ICT Sektor das Verhältnis zwischen der Digitalisierung und Wasserstoff und deren Chance, sich gegenseitig zu ergänzen.	Digitalisierung, Wasserstoff, BEV, digitalisierte Frachtketten, autonome Taxis, VTOL Taxis, Datenzentren



Path to hydrogen competitiveness. A cost perspective	Hydrogen Council	Dieser Bericht liefert die Beweisgrundlage für die Kostenwettbewerbsfähigkeit von Wasserstoff in 35 Anwendungsfällen, inkl. Transport.	Kostenwettbewerbsfähigkeit H2, H2 Produktion und Distribution, H2 Anwendungen (v.a. Transport)
Comparative Analysis of Infrastructures: Hydrogen Fueling and Electric Charging of Vehicles	Jülich Forschungszentrum	Zielsetzung der Analyse ist eine detaillierte Auslegung und Untersuchung der notwendigen Infrastrukturen für unterschiedliche Marktdurchdringungen von batterieelektrischen Fahrzeugen sowie von Wasserstoff-Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen in Deutschland.	BEV vs. H2, Status Quo, SWOT Analyse, Meta Analyse, Analyse Infrastruktur für BEV vs. H2
Green Hydrogen Investment and Support Report. Hydrogen Europe's input for a post COVID-19 recovery plan	Hydrogen Europe	In diesem Bericht werden die insgesamt erforderlichen Investitionen für den Aufbau eines Wasserstoffsystems in der Europäischen Union bis 2030 eingeschätzt.	Wasserstoff Herstellung, Wasserstoff Infrastruktur und Speicherung, Wasserstoff Anwendungen inkl. Mobilität, Heizung und traditionelle sowie neue Industrie-Rohstoffe



Titel	Potenziale der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie in Baden-Württemberg
Veröffentlichungsdatum	Februar 2020
Autor	Roland Berger und Autoren vom IPE Institut für Politikevaluation GmbH). Begleitet von e-mobil BW GmbH
Auftraggeber	Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft des Landes Baden-Württemberg
Finanzierung	Strategiedialog Automobilwirtschaft Baden-Württemberg
Ziel der Studie	Eine Einschätzung von Potenzialen der Wasserstoff- und Brennstoffzellenindustrie in Baden-Württemberg.
Methodik	Die Ergebnisse der Studie beruhen neben eigenen Analysen und Berechnungen zu Marktszenarien sowie Kostenentwicklungen auf einer umfangreichen Berücksichtigung aktueller Studien und öffentlicher Statistiken zum Thema sowie auf den Ergebnissen einer onlinebasierten Stakeholder-Umfrage unter mehr als 50 baden-württembergischen Unternehmen, Forschungseinrichtungen und weiteren Akteuren der lokalen Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Wirtschaft. Die Analysen und Ergebnisse der Studie wurden zudem durch 20 Interviews mit Experten aus Industrie, Forschung und Verbänden, hauptsächlich aus Baden-Württemberg, ergänzt und validiert.
Inhalt und Ergebnis	Nach einem Überblick über die zentrale Rolle von Wasserstoff und Brennstoffzellen im zukünftigen Energiesystem und ihren vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten, folgt eine Analyse der Kostenentwicklung der Technologie. Es werden die Rahmenbedingungen sowie Zukunftsszenarien für die weitere Marktentwicklung der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie auf globaler, europäischer, deutscher und baden-württembergischer Ebene untersucht, als auch der aktuelle Entwicklungsstand der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie in Baden-Württemberg in den Blick genommen. Im Anschluss erfolgt basierend auf Abschätzungen des zukünftigen Umsatzpotenzials der Wasserstoff und Brennstoffzellen-Industrie eine Prognose der zusätzlichen Bruttowertschöpfung und der damit einhergehenden Arbeitsplätze in der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie Baden-Württembergs. Abschliessend werden die Herausforderungen für die weitere Marktentwicklung sowie mögliche Lösungsansätze diskutiert und basierend auf den Ergebnissen der Studie spezifische Handlungsempfehlungen für die relevanten Stakeholder in Baden-Württemberg abgeleitet. Laut der Studie ist im Jahr 2030 eine Bruttowertschöpfung in Baden-Württemberg von bis zu zwei Milliarden Euro in der Wasserstoff- und Brennstoffzellenindustrie möglich. 13 000 Menschen könnten in der Branche beschäftigt werden. Langfristig bestünden noch weitaus größere Potenziale. Voraussetzung: Investitionen, um im internationalen Wettbewerb konkurrenzfähig zu bleiben.



Titel	Energie der Zukunft? Nachhaltige Mobilität durch Brennstoffzelle und H2
Veröffentlichungsdatum	März 2017
Autor	Shell Deutschland Oil GmbH in Zusammenarbeit mit dem Wuppertal Institut
Auftraggeber	Shell Deutschland Oil GmbH
Finanzierung	Shell Deutschland Oil GmbH
Ziel der Studie	Zukunftspotenziale von Wasserstoff abschätzen, Business Opportunities analysieren, Schwerpunkt (Auto)Mobilität und Geschäftspartner/Kunden/Stakeholder informieren
Methodik	k.A.
Inhalt und Ergebnis	In Zusammenarbeit mit dem Wuppertal Institut hat Shell in dieser Studie den Entwicklungsstand der Wasserstoffforschung untersucht. Zunächst werden natürliche Vorkommen, Eigenschaften sowie historische Sichtweisen des Elements Wasserstoff diskutiert. Anschließend werden aktuelle sowie künftige Verfahren und Ausgangsstoffe zur Erzeugung von Wasserstoff untersucht; dabei werden die Herstellungspfade in puncto Energieaufwand, Treibhausgasemissionen sowie Bereitstellungskosten miteinander verglichen. Weiterhin werden Fragen der Wasserstofflogistik untersucht. Dazu gehören zum einen heutige und künftige Speichermethoden, zum anderen die verschiedenen Transportoptionen und ihre jeweiligen Vorzüge einschließlich Fragen der Transportökonomie. Es folgt eine Darstellung der unterschiedlichen Nutzungsmöglichkeiten von Wasserstoff. Unterschieden wird zwischen stofflichen und energetischen Nutzungen. Die Analyse der energetischen Wasserstoffnutzung fokussiert auf die Brennstoffzelle - und nicht auf Wärmekraftprozesse. Auf der Anwenderseite werden energetische stationäre Anwendungen für die Back-up-Stromerzeugung sowie die Hausenergieversorgung - und diese einschließlich Wirtschaftlichkeit - untersucht. Den Schwerpunkt der Studie bilden (auto)mobile Wasserstoffanwendungen. Hierfür werden zunächst technologischer Stand und Perspektiven mobiler Anwendungen - von der Raumfahrt über Material Handling bis hin zum Pkw - erörtert. Anschließend wird die Wirtschaftlichkeit von wasserstoff-betriebenen Brennstoffzellen-Pkw (FCEV) mit Hilfe eines vereinfachten Autokosten-Vergleichs analysiert. Es schließt sich eine Diskussion des Aufbaus einer Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur für den Strassenverkehr an. Abschließend werden in Anlehnung an das ambitionierte 2DS-Wasserstoffszenario der Internationalen Energieagentur mögliche Auswirkungen von Brennstoffzellen-Pkw auf Kraftstoffverbrauch und Treibhausgasemissionen in ausgewählten Regionen bis 2050 diskutiert.



Titel	Treibhausgas-Emissionen für Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge mit Reichweiten über 300 m (inkl. Erläuterungen zur Studie)
Veröffentlichungsdatum	13. Juli 2019
Autor	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE: André Sternberg, Christoph Hank und Christopher Hebling
Auftraggeber	H2 Mobility Deutschland
Finanzierung	H2 Mobility Deutschland
Ziel der Studie	Aufstellung eines Lebenszyklus-Vergleiches von Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeugen.
Methodik	Untersucht wurden die erzeugten Treibhausgas-Emissionen (THG) bei Herstellung, Betrieb und Entsorgung von Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeugen mit Reichweiten ab 300 km, für die Zeiträume 2020 bis 2030 und 2030 bis 2040. Die Werte wurden darüber hinaus mit den Werten dieselgetriebener Pkw verglichen. Für diese Gegenüberstellung berechneten die Forscher, wie viel Material für die Produktion von Batterien, Brennstoffzellen und Wasserstofftanks benötigt wird und was bei der Förderung und der Verarbeitung an Emissionen anfällt.
Inhalt und Ergebnis	Der THG-Fußabdruck von Produktion und Recycling eines Brennstoffzellensystems einschl. Tank entspricht etwa dem eines Elektroantriebs mit 45 bis 50 kWh Speicherkapazität. Für Autos mit größeren Batterien werden mehr THG ausgestoßen als für das Brennstoffzellensystem in einer vergleichbaren Leistungsklasse. Im Betrieb ist die Energiequelle für Strom und Wasserstoff entscheidend. Den Annahmen der vom Berliner Think Tank Agora Verkehrswende veröffentlichten Studie folgend, hat das Fraunhofer ISE Solarstrom (Ladung zu Hause) als Optimum für das Batterieauto angenommen. Im Best Case-Szenario für Wasserstoff wird dieser aus 100 % Wind-energie erzeugt. Verglichen wurden aber auch erzeugte Emissionen beim Laden mit dem deutschen Strommix sowie die Wasserstoffproduktion im Mixed Case (50 % Erdgas und 50 % Windstrom) bzw. im Worst Case aus 100 % Erdgas. Bei einer Laufleistung von 150 000 km überzeugt das Brennstoffzellenfahrzeug in allen Fällen: Selbst im Worst Case (100 % H₂ aus Erdgas) liegt der THG-Fußabdruck im gesamten Lebenszyklus noch die nächsten zehn Jahre unter dem vergleichbarer Batteriefahrzeuge und ist ebenfalls geringer als bei Dieselfahrzeugen. Die Studie ist ein Beleg für die Komplementarität von Batterie und Wasserstoff. Fahrzeuge mit mittleren bis kleineren Batterien (< 50 kWh Speicherkapazität) und Reichweiten bis 250 km senken die Emissionen im Verkehr. Für höhere Reichweiten haben Brennstoffzellenfahrzeuge aus Sicht des Klimaschutzes zunehmende Vorteile. Sowohl für Batterie also auch für Wasserstoff gilt: Je grüner die Energiequelle, desto besser die Umweltbilanz



Titel	Hydrogen scaling up. A sustainable pathway for the global energy transition
Veröffentlichungsdatum	November 2017
Autor	Hydrogen Council in Zusammenarbeit mit McKinsey & Company
Auftraggeber	Hydrogen Council
Finanzierung	k.A.
Ziel der Studie	Ziel der Studie ist es, das langfristige Potenzial von Wasserstoff aufzuzeigen und eine entsprechende Roadmap vorzustellen.
Methodik	Für die Roadmap und die Vision wurde die Studie «Energy Technology Perspective» von IEA als Grundlage herangezogen, als auch die Meinung der Mitglieder des Hydrogen Rates miteinbezogen. Die Analyse erfolgte nach einer Segmentierung des Marktes in mehrere Bereiche (z.B. Transport, Industrieenergie etc.). Für Prognosen wurden zum Teil eigenständige Berechnungen durchgeführt, aber auch externe Daten herangezogen. Während die Meilensteine für 2030 im Allgemeinen nur für sog. Early Adopteres berechnet werden, wird für den Zeitraum bis 2050 mit einer weltweiten Einführung der Wasserstofftechnologien gerechnet.
Inhalt und Ergebnis	Die Studie zeigt, dass Wasserstoff nicht nur eine wichtige Säule der Energiewende ist, sondern auch das Potenzial hat, ein Geschäftspotenzial von 2,5 Milliarden US-Dollar zu entwickeln und bis 2050 mehr als 30 Millionen Arbeitsplätze zu schaffen. Wenn Wasserstoff in großem Maßstab eingesetzt wird, könnte er bis 2050 fast ein Fünftel des gesamten Endenergieverbrauchs ausmachen. Dies würde die jährlichen CO ₂ -Emissionen um etwa 6 Gigatonnen im Vergleich zu den heutigen Werten verringern und etwa 20 % zu der Verringerung beitragen, die erforderlich ist, um die globale Erwärmung auf zwei Grad Celsius zu begrenzen. Auf der Nachfrageseite sieht der Hydrogen Council das Potenzial von Wasserstoff, bis 2030 etwa 10 bis 15 Millionen Autos und 500.000 Lastkraftwagen anzutreiben, wobei Wasserstoff auch in vielen anderen Sektoren verwendet werden könnte, z.B. in industriellen Prozessen und Rohstoffen, bei der Gebäudeheizung und -verstromung, der Stromerzeugung und -speicherung. In einer Zeit, in der die Weltbevölkerung bis 2050 voraussichtlich um zwei Milliarden Menschen wachsen wird, haben Wasserstofftechnologien das Potenzial, Möglichkeiten für ein nachhaltiges Wirtschaftswachstum zu schaffen.



Titel	Hydrogen meets digital. New opportunities for the energy mobility system
Veröffentlichungsdatum	September 2018
Autor	Hydrogen Council
Auftraggeber	Hydrogen Council
Finanzierung	k.A.
Ziel der Studie	Ziel dieser Studie ist es herauszufinden, wie die Digitalisierung einerseits den Energieverbrauch beeinflusst und wie sie andererseits in Kombination mit Wasserstofftechnologien Synergien hervorrufen kann.
Methodik	Während informative Inhalte aus Diskussionen mit Akteuren aus der Industrie, von Start-ups bis hin zu OEMs, stammen, sind quantitative Berechnungen hingegen externen Quellen, insbesondere McKinsey Center for Future Mobility, zuzurechnen. Für die Einführungsquoten von Wasserstoff wurden Einschätzungen der Mitglieder des Hydrogen Councils herangezogen.
Inhalt und Ergebnis	Für den Energiewandel in Richtung erneuerbarer Strom ist man auf einen Energieträger angewiesen, der in der Lage ist, Sonnen- und Windenergie aufzunehmen, sie bis zu ihrer Endnutzung zu speichern und die Energie bei Bedarf wieder abzugeben. Dies kann heute durch den Einsatz von Brennstoffzellen, als auch Batterien ermöglicht werden. Anstatt, dass sie gegenseitig in Konkurrenz stehen, sind sie viel mehr als Komplementäre zu betrachten. So ist Wasserstoff besonders für Langstrecken und für schwere bzw. «vertikale» (z.B. fliegende) Transportarten geeignet, während Batterien im Nahverkehr einzusetzen sind. Der Bericht geht zudem auf sechs spezifische Anwendungsfälle ein, die die Autoren als besonders passend für Wasserstoffantriebe erachten: Autonome Taxis und Shuttles, LKW, Drohnen, fliegende Taxis und Datenzentralen. In Hinblick auf den Strassengüterverkehr vermerkt der Bericht, dass dieser aufgrund des wachsenden e-Commerce Marktes ebenfalls wachsen wird. Dies vor allem, weil Städte zunehmend den Einsatz von diesel- und benzinbetriebenen LKW verbieten werden. Da zusätzlich der Wasserstoff-Lkw deutlich leichter ist, wie derselbe Lkw mit einer Batterie, verfügt er über eine grössere Ladekapazität. Ebenfalls wird angemerkt, dass sich langfristig der Wasserstoff-Lkw ab einer gewissen Distanz (~100km) finanziell besser auszahlt, wie die Batterie.



Titel	Path to hydrogen competitiveness. A cost perspective
Veröffentlichungsdatum	20. Januar 2020
Autor	Hydrogen Council, McKinsey & Company und E4tech
Auftraggeber	Hydrogen Council
Finanzierung	k.A.
Ziel der Studie	Dieser Bericht liefert die Beweisgrundlage für die Kostenwettbewerbsfähigkeit von 40 verschiedenen Wasserstofftechnologien anhand von 35 Anwendungsfällen, inkl. Transport und weist auf die rasante Abnahme von Wasserstoffkosten hin.
Methodik	Für die Analyse der Gesamtkosten, fand eine Gegenüberstellung zwischen kohlenstoffarmen, erneuerbaren Wasserstoffenergien und kohlenstoffarmen, als auch konventionellen Alternativen statt (z.B. H ₂ vs. Diesel oder BEV). Dabei wurden nur Wasserstofftechnologien untersucht, die sich in Realität auch skalieren lassen. Es wurden vier Bereiche ausgesucht, in denen sich Wasserstoff als Energieträger einsetzen lassen, welche wiederum in 35 weitere Untereinheiten geteilt worden sind. Zusätzlich wurden mehr als 40 Technologien für die Wasserstoffproduktion und -verteilung modelliert, die eine Reihe von Produktionsmethoden, Umwandlungsschritten (z.B. Kompression, Verflüssigung) und Verteilungswegen abdecken. Im Anschluss wurden die Gesamtkosten von Wasserstoff pro Anwendungsmöglichkeit mit gegenwärtigen Alternativen verglichen und die Ergebnisse von einem unabhängigen Expertenteam überprüft. Im Allgemeinen wurden die Wasserstoffkosten auf der Grundlage eines Durchschnitts von Erdgasreformierung und CCS (CO ₂ -Abscheidung und -Speicherung) sowie von erneuerbarem Wasserstoff aus erneuerbarer Stromerzeugung und Elektrolyse geschätzt.
Inhalt und Ergebnis	Mit dem weiteren Ausbau der Wasserstoffproduktion, -verteilung, -ausrüstung und -Komponentenherstellung werden die Kosten für eine Vielzahl von Anwendungen bis 2030 voraussichtlich um bis zu 50% sinken, wodurch Wasserstoff gegenüber anderen kohlenstoffarmen Alternativen und in einigen Fällen sogar gegenüber konventionellen Optionen wettbewerbsfähig wird. Dies macht Wasserstoff zu einem potenziellen Game-Changer in mehreren Bereichen, einschließlich Langstrecken- und Schwerlasttransporte, industrielle Heizung und Rohstoffe für die Schwerindustrie, die zusammen etwa 15% des globalen Energieverbrauchs ausmachen. Nach Ansicht der Wirtschaftswissenschaftler wird die Skalierung der Wasserstoff-Wertschöpfungskette die größte Triebkraft für zukünftige Kostensenkungen sein. Um die entsprechende Skalierbarkeit von H ₂ zu erreichen, werden rund 70 Mrd. Dollar an Investitionen erforderlich sein; und obwohl dies beträchtlich ist, macht es weniger als 5% der jährlichen globalen Energieausgaben aus. Die Gelder sollten dabei v.a. auf 1. die Produktion, 2. den Transportsektor und 3. Heizsysteme verteilt werden. Gleichzeitig muss ein Markt für Wasserstoff geschaffen werden, wo die Nachfrage stimuliert und die Marktunsicherheit verringert wird. Auch wenn viele Industrieländer bereits Strategien für den Einsatz von Wasserstoff-Energielösungen entwickelt haben, muss das Feld für den Einsatz von Wasserstoff noch eingeplant werden, und zwar durch lokale Koordination, Vorschriften zur Beseitigung bestehender Hindernisse, Standardisierung und Anreize wie Steuererleichterungen und Subventionen.



Titel	Comparative Analysis of Infrastructures: Hydrogen Fueling and Electric Charging of Vehicles
Veröffentlichungsdatum	23. Januar 2018
Autor	Forschungszentrum Jülich GmbH (Institut für Elektrochemische Verfahrenstechnik (IEK-3))
Auftraggeber	k.A.
Finanzierung	H2 Mobility
Ziel der Studie	Zielsetzung der Analyse ist eine detaillierte Auslegung und Untersuchung der notwendigen Infrastrukturen für unterschiedliche Marktdurchdringungen von batterieelektrischen Fahrzeugen sowie von Wasserstoff-Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen in Deutschland.
Methodik	Die Studie umfasst eine umfangreiche Meta-Analyse von bestehenden Studien mit Aussagen zum Infrastrukturausbau beider Technologien. Basierend auf der Erkenntnis, dass vor allem für eine hohe Marktdurchdringung die existierenden Studien nicht ausreichen und die Datenlage teilweise intransparent ist, werden detaillierte eigene Szenario-Berechnungen zur Infrastrukturauslegung durchgeführt und techno-ökonomisch analysiert.
Inhalt und Ergebnis	Die Analyse der Szenarien zeigt, dass die Investitionen in den Infrastrukturausbau für beide Technologiepfade bei geringen Fahrzeugbeständen bis hin zu einigen Hunderttausend nahezu gleich sind. In der Übergangsphase erfolgt die Umstellung der Wasserstoffherzeugung auf die ausschließliche Nutzung von regenerativem Überschuss-Strom, welche durch den Bau von saisonalen Wasserstoffspeichern zur Überbrückung von 60 Tagen flankiert wird. Das Konzept ermöglicht die Versorgung mit grünem Wasserstoff. In der Anfangsphase sind hierfür höhere Investitionen erforderlich als bei der Ladeinfrastruktur. Vergleicht man die kumulierten Investitionen beider Konzepte für eine hohe Marktdurchdringung von 20 Mio. Fahrzeugen, liegen die Investitionen für eine Ladeinfrastruktur mit rund 51 Mrd. € deutlich höher im Vergleich zur Wasserstoff-Infrastruktur mit rund 40 Mrd. €. Die resultierenden Kilometer-spezifischen Kosten sind bei hohen Marktdurchdringungen für beide Versorgungskonzepte annähernd gleich. Sie liegen im Durchschnitt bei 4,5 €/km für das elektrische Laden und bei 4,6 €/km für den Wasserstoff. Da die elektrische Erzeugung und Speicherung des Wasserstoffs die Nutzung von sonst nicht nutzbarem erneuerbaren Strom direkt vor Ort ermöglicht, wird die geringere energetische Effizienz des Wasserstoff-Pfades annähernd durch den die niedrigeren Kosten des Überschuss-Strombezugs ausgeglichen. Durch die Nutzung von erneuerbaren Stromüberschüssen und Netzstrom mit hohen Anteilen an erneuerbaren Energien sind die kilometerspezifischen CO₂ Emissionen für beide Versorgungsoptionen gering im Vergleich zur Nutzung von fossilen Kraftstoffen. Die Wasserstoff-Infrastruktur mit inhärenter saisonaler Speicherung kann höhere Anteile überschüssiger, erneuerbarer Energien integrieren und ist daher bei der CO₂-Reduktion im Vorteil. Jedoch kann eine auf die Verfügbarkeit von erneuerbarem Strom ausgerichtete Ladestrategie der Batterie-Fahrzeuge deren CO₂-Emissionen weiter mindern. Für den Verkehrsbereich ist zu schließen, dass beide Infrastrukturen wichtige Bausteine sind, um klimaverträgliche, saubere und erneuerbare Verkehrskonzepte zu realisieren. Eine intelligente und komplementäre Kombination aus beiden Infrastrukturen kann die Stärken der Wasserstoff-Infrastruktur mit den Stärken des elektrischen Ladens verbinden und weniger zukunftsfähige Einzellösungen mit geringerer Systemfähigkeit oder Effizienz vermeiden.



Titel	Green Hydrogen Investment and Support Report.
Veröffentlichungsdatum	2020
Autor	Hydrogen Europe
Auftraggeber	k.A.
Finanzierung	k.A.
Ziel der Studie	In diesem Bericht werden die insgesamt erforderlichen Investitionen für den Aufbau eines Wasserstoffsystems bis 2030 eingeschätzt. Es werden die Kosten für erneuerbare Energien und Wasserstoffproduktion, für die Wasserstoffinfrastruktur und -speicherung sowie für Wasserstoffanwendungen berechnet und Hinweise bezüglich finanzieller Unterstützung gegeben, die in dieser ersten Phase des Aufbaus eines Wasserstoffsystems benötigt wird.
Methodik	Die Ausgangspunkte und Annahmen zur Schätzung der Gesamtinvestitionen für Wasserstoff bis 2030 stammen aus dem Papier "Green Hydrogen Europe's paper "Green Hydrogen for a European Green Deal - A 2x40 GW Initiative" (2x40 GW Green Hydrogen Initiative) und dem FCH JU-Bericht "Hydrogen Roadmap Europe - A sustainable pathway for the European Energy Transition" (Hydrogen Roadmap Europe).
Inhalt und Ergebnis	Wasserstoff wird eine zentrale Rolle bei der Verwirklichung einer erschwinglichen, sauberen und wohlhabenden Wirtschaft spielen. Um sich von der durch das COVID-19-Virus verursachten wirtschaftlichen Rezession zu erholen, können Investitionen in den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft zu einem sauberen und erschwinglichen Energiesystem beitragen, vor allem aber eine innovative neue Wasserstoffherstellungsindustrie aufbauen, die neue Arbeitsplätze und Wirtschaftswachstum schafft. Insgesamt werden in der EU die Gesamtinvestitionen bis 2030 auf 430 Milliarden Euro geschätzt, mit einer notwendigen Unterstützung von ca. 145 Milliarden Euro. Ausgehend von diesen Investitionen kann sich eine innovative und wettbewerbsfähige wasserstoffproduzierende Industrie etablieren und skalieren. Die EU und die Mitgliedstaaten könnten den Aufbau dieser Industrie unterstützen, indem sie unter anderem Darlehen, Mezzanine-Finanzierung und sogar Eigenkapital bereitstellen. Viele Unternehmen erwähnen jedoch, dass der wichtigste Faktor für die Erweiterung ihrer Herstellungskapazität darin besteht, ob sie sicher sein können, dass bis 2030 gewisse technologische Innovationen realisiert sein werden und der Anstieg der Wasserstoffnachfrage, von den Regierungen gesichert und garantiert wird.



BEV/elektrische Nutzfahrzeuge

Titel	Autor/Organisation	Kurzbeschreibung	Stichworte
Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge	StratOn	Eine Elektrifizierung von schweren Nutzfahrzeugen mittels oberleitungsgebundener Energieversorgung wird analysiert	Oberleitungsgebundene Fern-Lkw, Strassengüterverkehr, Treibhausgasemissionen, Autobahn-Kernnetz
Executive Analysis of Electric Truck Market, Forecast to 2025	Frost & Sullivan	Die Studie prognostiziert die Entwicklung des weltweiten Elektro-LKW-Markts (BEV und hybrid)	-
Unlocking Electric Trucking in the EU: recharging cities	Transport & Environment	Die Studie untersucht Einsatzmöglichkeiten von BEV-LKW in der naheliegenden Zukunft	EU, electric trucks
Sensitivitäten zur Bewertung der Kosten verschiedener Energieversorgungsoptionen des Verkehrs bis zum Jahr 2050	Öko-Institut	Die Gesamtkosten der Transformation hin zu einem vollständig dekarbonisierten Verkehr werden für verschiedene Energieszenarien beleuchtet	Gesamtkosten, Strassenverkehr, Infrastruktur
Elektromobilität im Schwerlastverkehr	Hochschule Fulda	Analyse (keine Studie) über die Einsetzbarkeit von BEV-LKW	-



Titel	Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge
Veröffentlichungsdatum	Februar 2020
Autor	Öko-Institut e.V., Hochschule Heilbronn, Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Intraplan Consult GmbH
Auftraggeber	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
Finanzierung	k.A.
Ziel der Studie	Analyse und Bewertung der Elektrifizierung von schweren Nutzfahrzeugen mit Schwerpunkt Gesamtkosten, Emissionsminderungen sowie technische und rechtliche Umsetzbarkeit bewertet werden.
Methodik	Ausgehend von Detailanalysen werden Markteinführungsszenarien entwickelt und diskutiert. Technologiebewertung und Entwicklung von Markteinführungsstrategien in Expertendialog und Projektbeirat diskutiert.
Inhalt und Ergebnis	Oberleitungsinfrastruktur hat hohes Potenzial für Minderung von Treibhausgasen (3-6 Mio. t tank to wheel). Geringere Nutzerkosten über Nutzungsdauer von 5 Jahren bereits 2025 möglich. Zulaufstrecken für logistische Umschlagpunkte eignen sich für frühe Elektrifizierung. Besonders ein Kernnetz von 4300km Länge bietet sich für Ausbau einer Oberleitungsinfrastruktur an. Aufbau einer Oberleitungsinfrastruktur mit verhältnismässig geringen Kosten verbunden. Kostenumlegung auf Nutzer würde allerdings wirtschaftlichen Erfolg in der frühen Marktphase verhindern. Politische Instrumente sind notwendig, um die Planungssicherheit zu erhöhen, beispielsweise CO ₂ -Aufschlag auf LKW-Maut. Oberleitungs-LKW im Vergleich zu strombasierten Kraftstoffen volkswirtschaftlich günstigere Option.

Titel	Executive Analysis of Electric Truck Market, Forecast to 2025
Veröffentlichungsdatum	26. Dezember 2017
Autor	Frost & Sullivan
Auftraggeber	k.A.
Finanzierung	k.A.
Ziel der Studie	Das Ziel der Studie ist einen Ausblick auf die Wachstumsmöglichkeiten des weltweiten Elektro-LKW-Markts zu geben.
Methodik	Die Studie stützt sich auf primäre und sekundäre Recherche: Die sekundäre Recherche stützt sich auf existierende Berichte und Material der Frost & Sullivan Datenbank, technische Paper, spezialisierte Magazine, Seminare und Internetrecherche. Die primäre Recherche stützt sich auf Telefoninterviews mit Senior Consultants / Industry Analysts mit OEM Zulieferern, Behörden und Verteilern. Die primäre Recherche macht 80% der Studie aus.
Inhalt und Ergebnis	Die Prognosen für 2025 der Märkte für Elektro-LKW sind: Der chinesische Elektromarkt wird zu 62 % von BEV-Trucks dominiert werden, der nordamerikanische zu 53% und der europäische zu 55%. An zweiter und dritter Stelle kommen jeweils Plug-in-Hybrid und Hybrid. Die Segmente für hybride und vollelektrische LKW wird bis 2025 auf mehr als 2,25 Millionen Stück anwachsen. China wird dabei mit einem Marktanteil von 60% dominieren. Preise für Batterien werden in den nächsten 4 bis 6 Jahren um 50% fallen. Lithium-Ionen-Akkus werden den Markt zunächst dominieren. Nach 2022 wird das kommerzielle Angebot des Lithium-Sulfur-Akkus erwartet.



Titel	Unlocking Electric Trucking in the EU: recharging in cities
Veröffentlichungsdatum	Juli 2020
Autor	Lucien Matthieu
Auftraggeber	Transport & Environment
Finanzierung	Transport & Environment
Ziel der Studie	Es soll untersucht werden, wie der Einsatz von Elektro-LKW in der EU erhöht werden kann.
Methodik	Quantitative Datenanalyse, aus der Ergebnisse abgeleitet werden.
Inhalt und Ergebnis	Es werden die Verkehrsströme innerhalb der EU analysiert. Hier zeigt sich, dass die Hälfte der gesamten LKW-Aktivität (in tkm, gute Näherung für CO ₂ -Emissionen) bei Distanzen von weniger als 300km entsteht. Diese Transporte können mit BEV-LKW getätigt werden. Dies wird allerdings durch den Mangel an Ladeinfrastruktur behindert. Bei der Analyse der Verkehrsströme zeigt sich ausserdem, dass es Hotspots für Warenverkehr gibt, in denen ein grosser Anteil des Gesamtverkehrs stattfindet. Für den Verkehr innerhalb eines Hotspots ist ein Umstieg auf Elektromobilität schon früh lohnenswert. Es werden abschliessend Empfehlungen an die Politik gegeben, um einen emissionsarmen Verkehr in den 2020er umzusetzen.

Titel	Sensitivitäten zur Bewertung der Kosten verschiedener Energieversorgungsoptionen des Verkehrs bis zum Jahr 2050
Veröffentlichungsdatum	Februar 2019
Autor	Moritz Mottschall, Peter Kasten, Sven Kühnel, Lukas Minnich, Öko-Institut
Auftraggeber	Umweltbundesamt
Finanzierung	Umweltbundesamt
Ziel der Studie	Ziel der Studie ist es, die Gesamtkosten der Transformation hin zu einem vollständig dekarbonisiertem Verkehr für verschiedene Energieszenarien und -optionen in Deutschland bis zum Jahr 2050 zu beleuchten.
Methodik	Überarbeitung der Ergebnisse für verschiedene Szenarien aus einer älteren Studie in Form einer Sensitivitätsbetrachtung.
Inhalt und Ergebnis	Es werden vier verschiedene Szenarien betrachtet: Power-to-Liquid, Power-to-Gas, Power-to-H ₂ und Elektrofahrzeug. Die Ergebnisse der alten Studie werden hinsichtlich der Kosten für die Energiebereitstellung und der Herstellung der Fahrzeugkomponenten aktualisiert. Im Strassenverkehr ist die Transformation hin zur Elektrifizierung die kostengünstigste Option. Power-to-X in Form von Methan oder Flüssigtreibstoff sind ähnlich teuer. Brennstoffzellenfahrzeuge weisen hingegen die höchsten Kosten auf. Die Kosten für die Energieversorgung des Verkehrssektors und die Fahrzeugherstellungskosten dominieren die Gesamtkosten. Je länger die Fahrleistung, desto bedeutender werden die Kosten für die Energieversorgung. Die Kosten für den Umbau der Infrastruktur stellen hingegen nur einen kleinen Anteil im Vergleich zu den anderen Kostenblöcken dar.



Titel	Elektromobilität im Schwerlastverkehr (Studienanalyse, keine Studie)
Veröffentlichungsdatum	2017
Autor	Boris Zimmermann, Hochschule Fulda
Auftraggeber	k.A.
Finanzierung	k.A.
Ziel der Studie	Ziel der Studie ist die zu überprüfen, inwiefern elektrische Antriebe in schweren LKW sinnvoll sind
Methodik	Es werden bestehende Studien zum Thema kritisch hinterfragt und Herstellerangaben zu Fahrzeugen herangezogen. Ausserdem werden Testfahrten durchgeführt, bei denen Daten gesammelt werden.
Inhalt und Ergebnis	In den bisherigen werden Ungenauigkeiten in den Bereichen Logistik, Verbrauchsverhalten und Wirtschaftlichkeit aufgedeckt. Es wird ausserdem auf eine Studie hingewiesen, die auf den geringen Anteil an Strecken hinweist, auf denen der Einsatz von batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugen sinnvoll ist. In einer eigenen Analyse hinsichtlich des Marktpotenzials wird festgestellt, dass sich nur 20% des Logistikmarktes für Elektronutzfahrzeuge anbieten. In Kombination mit dem geringen Anteil der für BEV-LKW geeigneten Strecken werden die potenziellen CO ₂ -Einsparungen als sehr gering eingeschätzt. Beim Vergleich von Diesel und BEV ergibt sich, dass BEV etwas besser hinsichtlich als der Diesel abschneidet. Soll allerdings die Reichweite des BEV eine vergleichbare Reichweite wie der Diesel aus dem Fallbeispiel haben, so ist die CO ₂ -Bilanz des BEV etwas schlechter als die des Diesels. Bei den Testfahrten wird festgestellt, dass der Verbrauch höher ist als die Herstellerangaben. Es gab ausserdem Überhitzungs- und Batterieprobleme. Die logistische Einsetzbarkeit von BEV ist also nur unter optimalen Bedingungen gegeben. Es wird auf Alternativen wie Aerodynamik, Leichtbau, Fahrertraining Filtersysteme und emissionsarme Technologien wie LNG verwiesen.



CNG und LNG

Titel	Autor/Organisation	Kurzbeschreibung	Stichworte
Wie klimafreundlich ist LNG? Kurzstudie zur Bewertung der Vorkettenemissionen bei Nutzung von verflüssigtem Erdgas (LNG)	Fraunhofer-Institut für System und Innovationsforschung, DVGW- Forschungsstelle am KIT	Die Studie erörtert die Entstehung von Treibhausgasen bei der Herstellung von LNG. Es wird zwischen konventioneller und unkonventioneller Erdgasförderung unterschieden und es erfolgt ein Vergleich verschiedener Exportländer.	LNG Prozesskette, Erdgasförderung, Vorkettenemissionen, Treibhausgase
Decarbonization of on-road freight transport and the role of LNG from a German perspective	Öko-Institut e.V., International Council on Clean Transportation	Die Studie vergleicht sowohl die Tank-to-Wheel Emissionen als auch die Well-to-tank Emissionen von LNG mit denen eines Diesel Lkws. Dabei wird für LNG zusätzlich hinsichtlich der Motortechnologie, dem Ottomotor und dem HPDI-Motor unterschieden.	Well-to-tank, Tank-to-wheel, Well-to-wheel, Ottomotor, HPDI, Vorkettenemissionen, direkte Emissionen, indirekte Emissionen
Verflüssigtes Erdgas – Neue Energie für Schiff und LKW? Fakten, Trends und Perspektiven	Shell Deutschland, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Technische Universität Hamburg	Die Studie erläutert die Herstellung von LNG, stellt eine mögliche LNG-Versorgungskette dar und beschreibt Potenziale von LNG für den Einsatz in Schifffahrt und Lkw.	LNG, Herstellung von LNG, Versorgungskette
Senken Gas-Lkw Emissionen?	Transport & Environment	Die Kurzstudie zeigt, dass Gas-Lkw nur geringfügig CO ₂ einsparen. Hinsichtlich Stickoxid- und Feinstaubemissionen können sogar schlechtere Werte auftreten.	Gas-Lkw, CO ₂ -Einsparungen, Feinstaubemissionen
CNG and LNG for vehicles and ships – the facts	Transport & Environment	Die Studie präsentiert die wichtigsten Erkenntnisse des Gebrauchs von Erdgas in Form von CNG und LNG.	Erdgas, LNG, CNG



Titel	Wie klimafreundlich ist LNG? Kurzstudie zur Bewertung der Vorkettenemissionen bei Nutzung von verflüssigtem Erdgas (LNG)
Veröffentlichungsdatum	Mai 2019
Autor	Fraunhofer-Institut für System und Innovationsforschung, DVGW- Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des KIT
Auftraggeber	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
Finanzierung	k.A.
Ziel der Studie	Eine Bewertung und Vergleich der Treibhausgasemissionen durch Herstellung und Transport von LNG.
Methodik	Die Kurzstudie führt Emissionswerte anderer Studien zusammen und vergleicht sie, wobei die unterschiedlichen Studien die Förderung von Erdgas in jeweils verschiedenen Ländern teilweise in verschiedenen Förderbecken betrachten.
Inhalt und Ergebnis	Zuerst betrachtet die Studie kurz den Erdgasmarkt und seine Hauptakteure und es folgt eine Erläuterung der Prozesskette der Erdgasförderung. Im Hauptteil der Studie werden die wesentlichen Emissionstypen und Ursachen beschrieben und schliesslich erfolgt ein Vergleich der Emissionen in der LNG Herstellung in verschiedenen Ländern. Die Bewertung berücksichtigt die Vorkettenemissionen auch im Falle einer leitungsgebundenen Gasversorgung. Ein Vergleich der Quelländer zeigt, dass lange Transportwege aus Australien und die unkonventionelle Gasförderung in den USA zu hohen Vorkettenemissionen bei einem Verbrauch in Europa führen. Die Studie kommt ausserdem zu dem Schluss, dass über Pipelines transportiertes Gas im Vergleich zu LNG zu bevorzugen ist, da die meisten Emissionen durch den Energieaufwand für Verflüssigung und Kompression während des Transports anfallen.



Titel	Decarbonization of on-road freight transport and the role of LNG from a German perspective
Veröffentlichungsdatum	Mai 2020
Autor	Öko-Institut e.V., International Council on Clean Transportation
Auftraggeber	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
Finanzierung	k.A.
Ziel der Studie	Die Klimafreundlichkeit von LNG im Vergleich zu Diesel als Lkw Treibstoff im Rahmen der 2019 verabschiedeten EU Standards bewerten
Methodik	Für die einzelnen Treibhausgaswerte wurde eine umfangreiche Literatur Recherche durchgeführt, sodass Werte unterschiedlicher Studien verglichen werden konnten. Zusätzlich wurde für die Kalkulation der Auspuffemissionen eine Simulation mit VECTO, dem Simulationstool der Europäischen Kommission umgesetzt.
Inhalt und Ergebnis	Die Studie kann in zwei Teile gegliedert werden. So werden im ersten Teil die verschiedenen tank-to-wheel Emissionsquellen erklärt und verglichen. Dabei wird auch zwischen verschiedenen Motortechnologien, dem Ottomotor und dem HPDI-Motor, differenziert. Im Vergleich schneidet der HPDI-Motor am besten ab, mit Werten von 7 bis 9 Prozent weniger Emissionen als ein herkömmlicher Diesel Lkw, während der Ottomotor zwei Prozent weniger bis zu einem Prozent mehr Treibhausgase emittiert als der Diesel Lkw. Der zweite Teil fokussiert sich auf die Vorkettenemissionen, die nach Land, konventioneller und unkonventioneller Förderung unterschieden werden können. Ein weiterer Abschnitt diskutiert die Bedeutung und Unterscheidungskriterien von Biomethan. Nachfolgend werden die Kosten für LNG betriebene Lkw betrachtet, die in Anschaffungs- und operative Kosten unterteilt werden können. Dabei wird betont, dass Anschaffungskosten für Ottomotoren niedriger sind als für HPDI-Motoren, und daher ihr Anteil eine deutliche Mehrheit bildet. Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass LNG Lkw keinen signifikanten Beitrag zum Erreichen der klimapolitischen Ziele beitragen kann, denn ihr Einsparungspotenzial ist zu niedrig. Ausserdem sind die Well-to-tank Emissionen sehr variable und steigen mit der Zunahme unkonventioneller Förderungsmethoden.



Titel	Verflüssigtes Erdgas – Neue Energie für Schiff und Lkw? Fakten, Trends und Perspektiven
Veröffentlichungsdatum	Februar 2019
Autor	Shell Deutschland, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Technische Universität Hamburg
Auftraggeber	k.A.
Finanzierung	k.A.
Ziel der Studie	Die Studie möchte das langfristige Potenzial von LNG als Endkraftstoff im Schiff- und Strassengüterverkehr aufzeigen.
Methodik	Die Studie bezieht sich sowohl auf Ergebnisse vorheriger Studien als auch auf eigene Simulationsergebnisse. Hierfür wurden verschiedene Tools wie VECTO, das Simulationstool der der EU-Kommission und ausgewählte Datenbanken verwendet.
Inhalt und Ergebnis	Zuerst betrachtet die Studie die Herstellung von LNG und berücksichtigt dabei ebenfalls mögliche Substitute wie Biomethan, Bio-SNG und Power-to-Gas. Die Studie beschreibt ebenfalls den aktuellen Erdgasmarkt und die Supply Chain, sowie die bereits bestehende Infrastruktur. Im Hauptteil der Studie erfolgt eine Bewertung von LNG als Kraftstoff für Schiffe und den Strassengüterverkehr. Dabei fällt die Beurteilung in beiden Fällen positiv aus, denn CO ₂ -, Stickoxid- und Schwefeldioxidemissionen können reduziert werden. Dieser Befund wird auch von den entwickelten Pro-LNG-Szenarien in der Simulation unterstützt, die eine Einsparung von 1,2 Mio. Tonnen Treibhausgasen im Jahr 2040 durch LNG im Strassengüterverkehr errechnen. Schlussendlich listet die Studie eine Reihe von Massnahmen, die die Politik umsetzen kann um die Verbreitung von LNG zu fördern. Darunter fallen ein einheitliches Genehmigungsverfahren für den Bau von LNG relevanter Infrastruktur, sowie mögliche steuerliche Entlastungen für treibhausärmere Kraftstoffe.

Titel	Senken Gas-Lkw Emissionen?
Veröffentlichungsdatum	September 2019
Autor	Transport & Environment
Auftraggeber	k.A.
Finanzierung	k.A.
Ziel der Studie	Es soll herausgefunden werden, inwiefern Gas-Lkw Emissionen senken
Methodik	k.A., konzeptionelle Arbeit, Literaturrecherche
Inhalt und Ergebnis	Gas-Lkw senken die Feinstaubemissionen deutlich weniger als von Fahrzeugherstellern angegeben. Die Stickoxid-Emissionen von Gas-Lkw liegen deutlich über denen von Dieselfahrzeugen. Die Nutzung von Biomethan führt nicht zu einer Senkung der Stickoxidemissionen. Die Treibhausgasemissionen von Gas-Lkw liegen, abhängig vom verwendeten Modell, nur geringfügig unter denen von Diesel-Lkw. Als Schlussfolgerung wird die Steuererleichterung von Gas und die damit verlorengelassenen Steuereinnahmen kritisiert. Förderungen sollen sich stärker auf emissionsfreie Antriebe wie Batterie, Oberleitung oder Wasserstoff beziehen.



Titel	CNG and LNG for vehicles and ships – the facts
Veröffentlichungsdatum	Oktober 2018
Autor	Transport & Environment
Auftraggeber	k.A.
Finanzierung	k.A.
Ziel der Studie	Es soll ein Überblick gegeben werden, inwiefern sich mit der Verwendung von Erdgas Kosten senken lassen.
Methodik	k.A., konzeptionelle Arbeit, Literaturrecherche
Inhalt und Ergebnis	Durch den Einsatz von Gas-Lkw lassen sich verglichen zu Diesel keine spürbaren CO ₂ -Emissionen einsparen. Auch die Luftqualität wird mithilfe von Gas-Lkw nicht verbessert. Auf der anderen Seite können mithilfe von Biogas oder synthetischem Gas aus erneuerbaren Energien deutlich CO ₂ -Emissionen eingespart werden. Allerdings sind nachhaltige Rohstoffe für die Herstellung von Biogas aus Abfällen sehr knapp. Pflanzenbasiertes Biogas ist mit hohen Landverlusten und indirekten CO ₂ -Emissionen verbunden. Synthetisches Methan aus erneuerbaren Energien ist ineffizient und teuer in der Produktion und führt zu einem starken Anstieg der Nachfrage nach erneuerbaren Energien.

11.2.2 Redesign Supply Chain

Titel	Autor/Organisation	Kurzbeschreibung	Stichworte
Green SCM – Von der lokalen Einzelmaßnahme bis zur globalen ökologisch optimierten Lieferkette	BearingPoint	In dem Whitepaper werden die häufigsten Scheitergründe von Green Supply Chain Management aufgeführt.	Green Supply Chain Management
Decarbonising Freight and Logistics	ITS for Climate initiative	Es werden Einsatzmöglichkeiten von Informations- und Kommunikationstechnik für eine nachhaltige Supply Chain untersucht.	Green Supply Chain Management, Information and communication technology
Logistics is an instrument for tackling climate change	Trasporti e Territorio	Die Studie erkundet, wie Aktivitäten in der Logistik die Art verbessern kann, den Klimawandel zu bekämpfen.	Logistics, climate change



Titel	Green SCM – von der lokalen Einzelmaßnahme bis zur globalen ökologisch optimierten Lieferkette
Veröffentlichungsdatum	k.A., um 2010
Autor	Matthias Wohlfahrt, Sebastian Vogt
Auftraggeber	BearingPoint
Finanzierung	BearingPoint
Ziel der Studie	Es sollen Gründe für das Scheitern von Green Supply Chain Management herausgearbeitet werden, um Potenziale für eine richtige Umsetzung aufzuzeigen
Methodik	Es werden die Rahmenbedingungen, die Einfluss auf die Supply Chain haben, aufgezeigt. Darauf aufbauend werden Massnahmen für die Supply Chain innerhalb des Unternehmens sowie unternehmensübergreifend abgeleitet.
Inhalt und Ergebnis	Es ist zu erwarten, dass in Zukunft allgemein die Transportkosten steigen werden. Grund hierfür ist u.a. ein steigender Ölpreis. Auch zukünftige Regularien wie ein zukünftiger Emissionshandel wird einen Einfluss auf die Kostenentwicklung in der Logistik haben. Ausserdem wird erwartet, dass der Produktionskostenunterschied zwischen Billiglohnländern in Asien oder Osteuropa und westlichen Ländern wie in Westeuropa oder Amerika abnehmen wird. Möglichkeiten für ein verbessertes Green Supply Chain Management innerhalb eines Unternehmens sind die Nutzung neuer Technologien, die Anpassung der Logistiknetzwerke etc. Hinsichtlich eines unternehmensübergreifendes Supply Chain Managements wird die Einführung eines Product-Lifecycle-Managements, die Entwicklung eines CO ₂ -optimalen End-to-End-Netzwerks empfohlen. Es wird darauf hingewiesen, dass ein Green Supply Chain Management bis zu einem bestimmten Grad Kosten- und Umweltziele vereint und dass Green Supply Chain Management deswegen auch in Konjunkturkrisen nicht zu vernachlässigen ist.



Titel	Decarbonising Freight and Logistics
Veröffentlichungsdatum	19. September 2019
Autor	Liam Fassam, Olivier Quoy
Auftraggeber	ITS for Climate initiative
Finanzierung	Edf, Banque des Territoires, Bordeaux Métropole, Ademe
Ziel der Studie	Mithilfe von Informations- und Kommunikationstechnologien sollen die CO ₂ -Emissionen in der Supply Chain verringert werden.
Methodik	Im ersten Teil werden allgemein Potenziale zur CO ₂ -Einsparung mithilfe von Informations- und Kommunikationstechnologien untersucht. Die Methodik des zweiten Teils ist das Aufzeigen von praktischen Anwendungsfällen von Informations- und Kommunikationstechnologien in der Supply Chain.
Inhalt und Ergebnis	Weltweit nimmt die Grösse der Logistikbranche zu. Gleichzeitig ist der Anteil der CO ₂ -Emissionen durch die Logistikbranche hoch, sodass hier Wege gefunden werden müssen, CO ₂ -effizienter zu wirtschaften. Eine Möglichkeit hierfür ist der Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologie (ITC). ITC kann auf mehrere Arten eingesetzt werden: Optimierung des Strassenverkehrs hinsichtlich Auslastung der Verkehrswege, Vernetzung von Fahrzeugen und Personen für etwa eine Ermöglichung von Truck-Sharing und Smart Logistics für eine Vernetzung von Fahrzeugen und Produkten für eine Optimierung der Ladung. Die Möglichkeiten des Einsatzes von ITC werden mit zahlreichen Praxisbeispielen gezeigt.

Titel	Logistics is an instrument for tackling climate change
Veröffentlichungsdatum	Januar 2010
Autor	Trasporti e Territorio
Auftraggeber	Europäisches Parlament
Finanzierung	k.A.
Ziel der Studie	Es werden Hintergründe vermittelt hinsichtlich Verbesserungen in logistischen Aktivitäten zur Reduktion von CO ₂ -Emissionen.
Methodik	k.A.
Inhalt und Ergebnis	Die Ergebnisse sind in erster Linie Empfehlungen an die Politik. Darin wird empfohlen, realistische Annahmen hinsichtlich der Entwicklung des Strassengüterverkehrs zu treffen. Es ist ausserdem der optimale Grad an Richtlinien zu finden und Langzeiteffekte zu berücksichtigen. Hinsichtlich des Unterkapitels, dass sich mit dem Redesign der Supply Chain beschäftigt, ist eine wichtige Aussage, dass es einen Zusammenhang zwischen ökonomischer Performance und Nachhaltigkeit gibt.

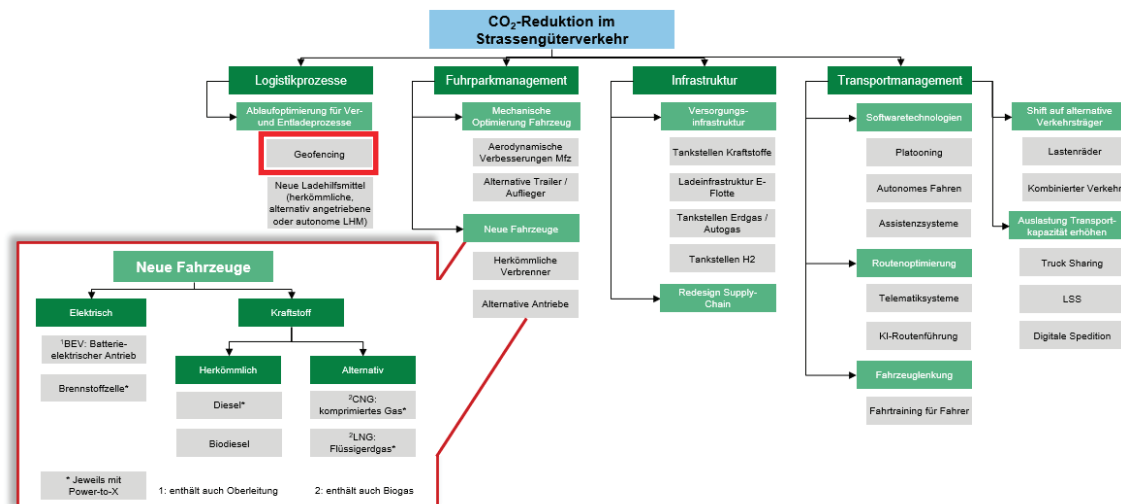
11.3 A3: Steckbriefe der Massnahmen

11.3.1 Logistikprozess

11.3.1.1 Ablaufoptimierung für Ver- und Entladeprozesse

Geofencing

Verortung der Massnahme im Cluster



Definition

Telematik-Systeme verbinden Kommunikation und Informatik und ermöglichen im Strassengüterverkehr unter anderem eine Überwachung der Position eines Lkws (Heise, o.D.) Diese Information kann in Echtzeit benutzt werden, um beispielsweise die Zeit einer Lieferung genauer zu planen und die Standzeit zu Beladungszwecken der Lkw zu verkürzen (Neitzel, 2019).

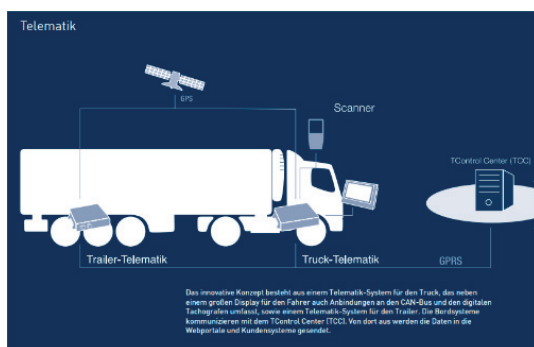


Abbildung 27 : Funktionsweise Geofencing (Trailer world, 2014)

Funktionsweise

Die Ortung geschieht durch ein am Lkw montiertes GPS Modul, welches mit Hilfe von Satellitensignalen den Standort bestimmt. Diese Information wird über eine Datenschnittstelle und Software im Unternehmen eingesehen oder auch dem Kunden zur Verfügung gestellt (Heise, o. D.).

Das Unternehmen selbst kann mit diesen Daten seine Einsatzplanung optimieren, indem es Auslastung und Leerfahrten besser koordiniert.

Ausserdem können Positionsdaten auch mit dem Empfänger der Lieferung geteilt werden, sodass mögliche Verspätungen aufgrund von Stau frühzeitig in die Planung mit einbezogen werden können. Dies ist von besonderer Relevanz für just-in-time Lieferungen.

Genaue Ankunftsdaten können aber auch den Warenumsatz verkürzen, wenn zu verladene Güter schon vor Ankunft des Lkws vorbereitet werden und dann schlussendlich ohne Wartezeiten bereitstehen (Neitzel, 2019).

Mithilfe von Geo Fencing kann ein Gebiet virtuell definiert und markiert werden. Verlässt bzw. erreicht ein Lkw diesen Bereich wird eine automatische System-Mitteilung generiert. Diese Anwendung wird unter anderem als Diebstahlschutz verwendet. Allerdings können auch Geofences um die eigenen bzw. um Kundenstandorte kreiert werden, um beispielsweise Ankunftszeit-Berechnungen genauer tracken zu können (Vimcar, o. D.).

Marktreife		Verbreitungsgrad	
Erste Ideen und Visionen	Vollständige kommerzielle Implementierung	Niedrig	Hoch
Telematik Systeme gibt es bereits seit mehreren Jahren am Markt und so existiert mittlerweile eine Vielzahl von Anbietern. Dabei gibt es sowohl Lösungen von OEMs wie Daimler, Scania und Volvo, aber auch Nachrüstungsoptionen von Drittanbietern wie GPS over IP und Arealcontrol sind zahlreich. Auch die Auswahl an Apps, mit denen auf die Daten zugegriffen wird und welche die Daten visualisieren nimmt kontinuierlich zu (Johanning, 2017).		Laut einer Deloitte Studie besitzt bereits heute die Hälfte aller Lkw auf deutschen Strassen ein Telematik System. Nach Angaben der Unternehmensberatung McKinsey wird diese Anzahl bis 2030 auf über 80% ansteigen. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass es verschiedene Anwendungsbereiche gibt. So ist die Routenplanung mit Hilfe von Telematik sowie die Verknüpfung mit dem Enterprise Resource Planning des Kunden üblich, während die Beladungsplanung weniger häufig mit den Daten von Telematik-Systemen erfolgt (Neitzel, 2019).	
SWOT-Analyse			
Stärken		Chancen	
- Der Einsatz von Telematik Systemen kann die Produktivität eines Fahrzeuges und der an den Transport angrenzenden Logistikprozesse deutlich erhöhen, in dem Ankunftszeiten besser vorhergesagt und Standzeiten zur Beladung verkürzt werden (Neitzel, 2019). - Die Anwendung von Telematik birgt bereits zahlreiche Möglichkeiten, denn die gesammelten Daten haben viele Verwendungszwecke. Neben Routenoptimierung und einem erhöhten Diebstahlschutz ist die Auftragsabwicklung über ein Telematik System möglich.		- Die Auswahl verschiedener Produkte für Flottenbetreiber ist gross. Die Verfügbarkeit von Nachrüstlösungen bietet ausserdem Flexibilität (Johanning, 2017). - Je mehr Teilnehmer ein Telematik System verwenden, desto genauer werden die Berechnungen des Systems. Dadurch können Staus und Ankunftszeiten immer präziser berechnet werden (Neitzel, 2019).	
Schwächen		Risiken	
Andere Anforderungen an Telematik Systeme für Stückgutlogistik resultieren in einer kleineren Auswahl an Produkten in dieser Kategorie (Johanning, 2017).		- Das Tracking des Fahrzeuges ist auch ein Eingriff in die Privatsphäre des Fahrers, weshalb seine Zustimmung erforderlich ist. Doch auch über die rechtlichen Rahmenbedingungen hinaus, muss der Flottenbetreiber sich mit um Datenschutz kümmern, denn nicht jeder sollte Zugriff auf die teilweise sensiblen Firmendaten erhalten (VerkehrsRundschau, 2019). - Die Daten des Telematik Systems sollten in andere Informationssysteme integriert werden können, um eine Verwendung bspw. im Transport-Management-System zu erlauben. Datensilos sollten vermieden werden, um ein übersichtliches Management zu gewährleisten (VerkehrsRundschau, 2019).	

Anbieter
 webfleet solutions a Bridgestone company Webfleet Solutions Ursprünglich als Tom Tom Telematics bekannt, wurde das Unternehmen 2018 an Bridgestone verkauft und heisst jetzt webfleet solutions (Schaefer, o. D.)



- Die Produkte von Webfleet Solutions sind zahlreich und umfassen neben Lösungen für LKW auch Anhänger, leichte Nutzfahrzeuge und Pkw.
- Das Webfleet Asset Tracking bietet ein präzises GPS Tracking für modernes Fuhrparkmanagement. Die Anwendung beinhaltet auch Geo Fencing als Diebstahlschutz, zur Routenüberwachung und für eine automatisierte Gehaltsabrechnung (Webfleet Solutions, 2020)



Trendfire Technologies

- Der Anbieter Trendfire Technologies bietet Telematik Lösungen für Lkw und Trailer.
- Mit seinem Flottenmanagement verspricht er einen besseren Überblick, gesteigerte Effizienz und die Möglichkeit zur Automatisierung. Auf gesammelte Informationen kann unkompliziert über eine App zugegriffen werden.
- Das Produkt bietet die Chance Geo Fencing zu verwenden (Trendfire Technologies, o. D.)

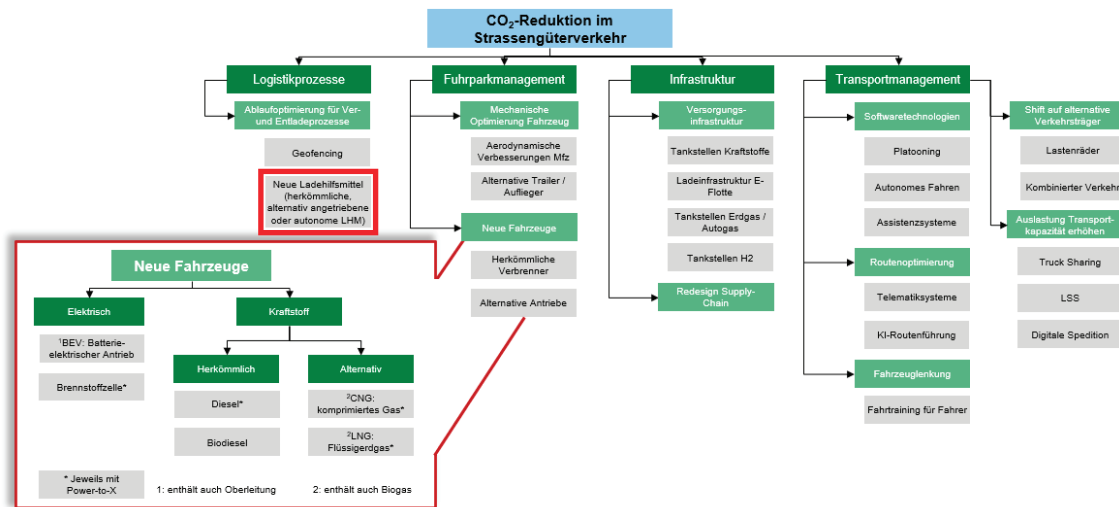


Fleet.tech

- Die Produkte von Fleettech sind nicht nur für Lkw angepasst, sondern werden auch für Busse, Baustellenfahrzeuge, Express- und Kurierdienste sowie Fahrzeugvermietungen angeboten.
- Die Contractor App ermöglicht ein problemloses Teilen von freigegebenen Informationen mit dem Auftraggeber (LOSTnFOUND, o. D.)

Neue Ladehilfsmittel

Verortung der Massnahme im Cluster



Definition

Gabelstapler gehören zu den gängigsten Ladehilfsmitteln und werden in der Lagerlogistik eingesetzt, um das Handling von schweren Gütern und die Beladung von bspw. Lkw zu vereinfachen. Die gewöhnlichste Ladeinheit eines Gabelstaplers sind Paletten. Heutzutage können Gabelstapler mit verschiedenen Antriebstechnologien ausgestattet und verwendet werden (Logistik Knowhow, 2013).

Funktionsweise

Gabelstapler können sehr schwere Lasten heben ohne dabei umzukippen aufgrund eines grossen Gegengewichts im Heck des Fahrzeugs. Das Hebemodul eines Gabelstaplers besteht aus einer Gabel mit zwei höhenverstellbaren Zinken und einem hydraulischen Hubsystem.

Gabelstapler existieren mittlerweile nicht mehr nur mit Dieselmotoren, sondern auch mit Verbrennungsmotoren für Gas und mit Elektroantrieben (Logistik Knowhow, 2013).

Ausserdem wurden bereits erste Projekte mit Brennstoffzellen Gabelstaplern durchgeführt (Poll, 2020).

Gabelstapler gibt es in verschiedenen Varianten und mit Anpassungen an das jeweilige Einsatzgebiet. So können Seitengabelstapler nicht nur von einer Seite Lasten aufnehmen, Schubmaststapler verfügen über einen kleinen Mast, an dem Ladung besonders hoch aufgenommen oder abgesetzt werden kann und Vierwegstapler können ihre Räder um bis zu 90 Grad verstellen, um seitlich zu fahren (Hompel & Heidenblut, 2011a; Hompel & Heidenblut, 2011b).



Marktreife		Verbreitungsgrad	
Erste Ideen und Visionen	Vollständige kommerzielle Implementierung	Niedrig	Hoch
			
Gabelstapler besitzen eine ausgeprägte Marktreife, denn sie sind bereits seit Jahrzehnten kommerziell implementiert. So wurde der erste Gabelstapler bereits 1917 gebaut und die erste Serienproduktion lief ab 1946 in Grossbritannien vom Band. Während Dieselstapler das Standardmodell darstellen, besitzen auch Fahrzeuge mit Gas- oder Elektroantrieb heute bereits Marktreife (Duessel-Stapler Helmuth Poensgen, o. D.).		Die Einsatzgebiete von Gabelstaplern sind vielseitig und zahlreich und ihre Verbreitung ist daher hoch. Während Benzingabelstapler in der EU sehr selten vorkommen, sind Gabelstapler der weiteren Antriebstechnologien gängig (Staplerberater, o. D.). Schon seit 2009 liegen die Absatzzahlen in Europa für Elektrogabelstapler allerdings über denen von Gabelstaplern mit Verbrennungsmotor. Somit ist ein klarer Trend zu den elektrischen Flurförderfahrzeugen erkennbar (Hofmann, 2016). 2019 lag der Absatz von Elektrogabelstaplern bei über 97.000 Stück in Europa (Statista, 2020).	
SWOT-Analyse			
Stärken		Chancen	
- Elektrische Gabelstapler stossen durch ihre Nutzung keine Emissionen aus und können daher auch in geschlossenen Räumen verwendet werden. Ausserdem sind sie leiser und umweltschonend (Staplerberater, o. D.). - Elektrostapler haben einen kleineren Wendekreis und sind daher geeigneter für engere Gänge und Räume. Ausserdem brauchen ihre Fahrer etwas weniger Geschick und Erfahrung, da das Fahrzeug schneller reagiert (Staplerberater, o. D.). - Im Normalfall weisen elektrische Flurförderfahrzeuge geringere Kosten für Verschleiss und Reparatur auf (Staplerberater, o. D.).		- Aufgrund der geringeren Wartungs- und Reparaturkosten kann der elektrische Gabelstapler trotz höherer Anschaffungskosten eine insgesamt günstigere Option sein (Staplerberater, o. D.). - Sowohl elektrische Gabelstapler als auch gasbetriebene Modelle können die Emissionen im Vergleich zu Dieselfahrzeugen reduzieren und somit zur einer verbesserten Umweltfreundlichkeit beitragen (Staplerberater, o. D.).	
Schwächen		Risiken	
- Elektrostapler haben eine limitierte Einsatzzeit, denn sie müssen pausieren, um geladen zu werden oder es muss ein Batteriewechsel erfolgen, was ebenfalls Zeit beansprucht (Staplerberater, o. D.). - Elektrische Gabelstapler sind auf unebenem Boden weniger geeignet als Flurförderfahrzeuge mit Verbrennungsmotor. Das gleiche gilt für den Einsatz über lange Strecken und sehr hohe Ein- oder Abladepunkte der Ware (Staplerberater, o. D.).		- Die Batterie muss gut gepflegt werden damit das Fahrzeug seine geplante Lebensdauer erreicht. Dazu gehört der richtige Umgang mit einer Batterie insbesondere das Laden, aber auch das regelmässige Nachfüllen von Batteriewasser (Staplerberater, o. D.). - Unabhängig von der Antriebstechnologie müssen eventuelle Infrastrukturanpassungen und die damit einhergehenden Anforderungen berücksichtigt werden. Elektrogabelstapler benötigen beispielsweise Ladesäulen und Batteriewasser. Ein Gasantrieb setzt voraus, dass Reservegasflaschen in einem geschützten Lager aufbewahrt werden können, ebenso wie Dieselfahrzeuge einen Treibstofftank voraussetzen (Staplerberater, o. D.).	



Anbieter

TOYOTA

MATERIAL HANDLING

Toyota

- Der Automobilhersteller aus Japan bietet auch eine breite Produktpalette von knapp 200 Flurförderfahrzeugen an. Darunter sind sowohl Verbrennungsmotoren für Diesel oder Gas als auch elektrische Antriebe zu finden.
- Die Nenntragfähigkeit von Elektrostaplern und Dieselstaplern erreicht bis zu 8 Tonnen (Toyota Material Handling Schweiz, o. D.).
- Seit 2009 bietet die Firma Gabelstapler auch als Hybrid an (Logistra, 2021).
- Mit einem Marktanteil von über 27% ist Toyota der weltweit grösste Hersteller von Flurförderfahrzeugen (Statista, 2021).



Kion

- Auch die deutsche Firma Kion ist ein Gabelstaplerhersteller und bietet eine vielfältige Auswahl von Fahrzeugen und Marken.
- Das Unternehmen entstand 2006 aus der Abspaltung der Staplersparte der Linde AG.
- Neben der Herstellung von Flurförderfahrzeugen ist die Gruppe auf Automatisierungstechnik spezialisiert (Handelsblatt, o. D.).
- Das Unternehmen ist Marktführer in Europa und bedient weltweit über 14% des Marktes (Statista, 2021).



Still

- Die Still GmbH aus Hamburg ist Teil der Kion Gruppe und hat sich auf Flurförderfahrzeuge spezialisiert. Dazu gehören neben klassischen Gabelstaplern unter anderem auch Schubmasterstapler, Hochhubwagen und Kommissionierer.
- Sowohl die Gas und Diesel betriebenen Fahrzeuge als auch die Elektrogabelstapler schaffen je nach Konfiguration eine Tragfähigkeit von bis zu 8 Tonnen (STILL, o. D.).
- Ausserdem beinhaltet die Still Produktpalette seit 2016 auch Hybridstapler (Schweikl, 2016).



Pilotprojekte



Name des Projekts	Brennstoffzellen-Stapler im Pilotprojekt
Dauer des Projekts	2013
Projektvolumen	-
Projektrahmen und -partner	Stark Gruppe, H2 Logic, HyLIFT-Demo-Projekt der EU Kommission
Testfeld	Auslieferungslager im dänischen Südhafen des Baustoffhändlers Stark
Datenbasis	Verwendung von 4 Stil Gabelstaplern, die mit H2-Logic-Brennstoffzellen ausgestattet wurden
Vorläufige Ergebnisse	- Das Betanken erfolgt innerhalb weniger Minuten und ist ein enormer Vorteil gegenüber den langen Ladezeiten von Elektrostaplern. - Der emissionsfreie Antrieb ermöglicht einen umweltfreundlichen Einsatz. - Die Infrastruktur für Brennstoffzellenfahrzeuge ist deutlich platzsparender als die Ladesäulen, Wechselbatterien und Hallenkräne für elektrische Gabelstapler.

(Hebezeuge Fördermittel, 2013)



Name des Projekts	H2 IntraDrive
Dauer des Projekts	Jan/2014 – Juni/2016
Projektvolumen	Förderung von 2,9 Millionen durch das BMVI
Projektrahmen und -partner	Linde Material Handling, BMW Group, TUM
Testfeld	BMW Werk Leipzig
Datenbasis	Verwendung von 9 wasserstoffbetriebenen Gabelstaplern
Vorläufige Ergebnisse	- Das Projekt konnte eine Menge Vorteile identifizieren: So ist die schnelle Ladezeit von 1,5 Min deutlich effizienter als bei elektrischen Modellen. - Die Tankstellen können so positioniert werden, dass sie ohne extra Wege in den Logistikprozess eingebaut werden können. - Die Kosten entsprechen den Werten für Fahrzeuge mit Li-Ionen Batterie. - Das Aufkommen von Netzlastspitzen kann vermieden werden. - Es wurde ausserdem eine hohe Skalierbarkeit herausgefunden, da eine Tankstelle circa 300 Routenzüge bedienen kann. - Die Abwärme konnte für die Heizung der Halle verwendet werden. - Mittlerweile fahren 20% der Flurförderfahrzeuge im BMW Werk Leipzig mit Brennstoffzellenantrieb.

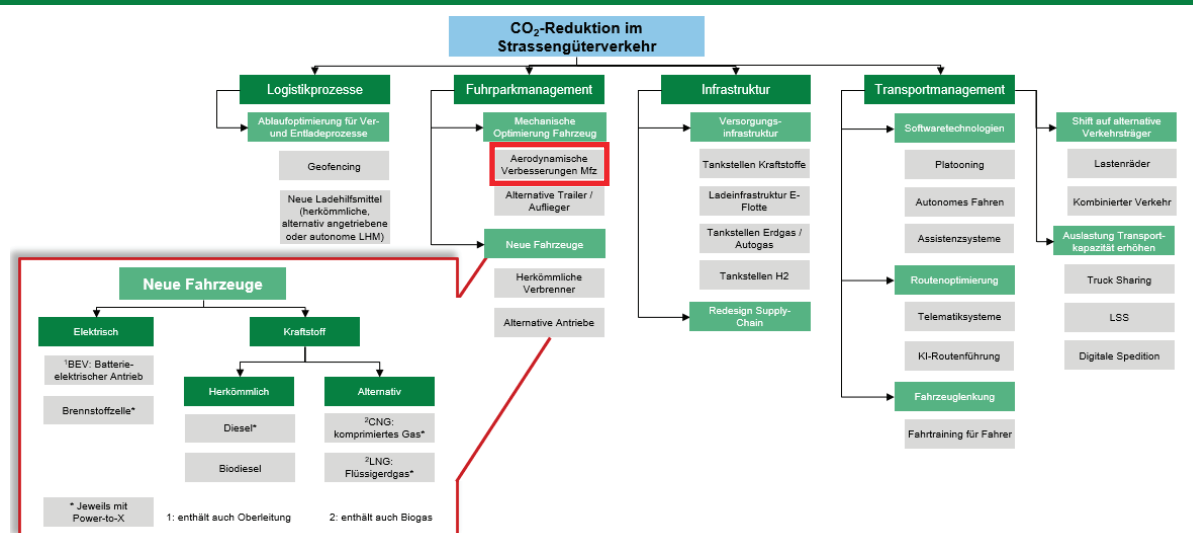
(Clean Intralogistics Net, o. D.; Poll, 2020)

11.3.2 Fuhrparkmanagement

11.3.2.1 Mechanische Optimierung Fahrzeug

Aerodynamische Verbesserung Mfz

Verortung der Massnahme im Cluster



Definition

Aerodynamische Verbesserungen sind Um- oder Anbauten (Designänderungen) an Zugmaschine und Sattelaufleger mit dem Ziel den Energieverbrauch eines Lkws zu senken, indem der Luftwiderstand reduziert wird (Jesgulke, 2017).

Funktionsweise

Hersteller entwickeln oft in Zusammenarbeit mit Forschung und Entwicklung neue Designoptimierungen an Fahrzeug und Sattelaufleger. Ziel dabei ist es immer den Luftwiderstandswert (CW) zu minimieren, der bei einem herkömmlichen Lkw zwischen 0,5 und 0,85 liegt (Jesgulke, 2017).

Die Entwicklung und Forschung erfolgt entweder in Windkanälen wie zum Beispiel am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) oder über 3D-Strömungssimulationen am PC. Einige Projekte arbeiten auch mit Versuchsfahrten in der Nacht.

Forschungsansätze betreffen sowohl die Optimierung der gesamten Fahrzeugform als auch die Gestaltung einzelner Komponenten wie der Seitenspiegel und des Unterbodens (Jesgulke, 2017).

Bei der aerodynamischen Verbesserung müssen aber stets die rechtlichen Grundlagen berücksichtigt werden, denn Anbauten an Heck und Seiten eines Lkws sind unzulässig. Ausserdem müssen teilweise Kompromisse bezüglich der Nutzlast eingegangen werden (Pudenz, 2012).



Marktreife		Verbreitungsgrad	
Erste Ideen und Visionen	Vollständige kommerzielle Implementierung	Niedrig	Hoch
Bereits heute gibt es verschiedene Ausprägungen von aerodynamisch verbesserten Lkw-Designs. So können Side Wings, die als seitliche Abdeckung der Reifen fungieren, bereits gekauft und verwendet werden (Lanzinger, 2013). Auch am Heck montierte Klappen, auch Boat Tails genannt, sind bereits im Einsatz. Ebenfalls die Teardrop Trailer, mit kurvenförmigem Dach sind bereits auf deutschen Strassen im Einsatz (Eschmeier, 2017). EU-Gesetzgebung, die eine um 90 cm verlängerte Fahrerkabine erlaubt ist seit September 2020 in Kraft. Dadurch wird einerseits ein windschnittigeres Design ermöglicht, andererseits kann die Sicherheit durch verbesserte Sicht erhöht werden (DVZ, 2019). Trotz vieler marktreifer Produkte gibt es weitere Forschungsprojekte. Innerhalb eines Wettbewerbs der Europäischen Kommission wird auch das Projekt «Aeroflex» des DLRs gefördert, welches eine Effizienzsteigerung von 18 bis 33% anstrebt. Abschluss des Projekts ist für März 2021 angedacht (Lischke, o. D.).		Während einige Produkte schon die Marktreife erreicht haben, ist die Verbreitung noch gering. Ein Grund dafür ist die Vielzahl der Anforderungsbereiche wie Funktionalität, Design, Sicherheit, Kosten und Wartung sein (Frank, 2012).	
SWOT-Analyse			
Stärken		Chancen	
- Der Mehrwert einer verbesserten Aerodynamik liegt in der Effizienzsteigerung und dem folglich niedrigeren Kraftstoffverbrauch (Jesgulke, 2017). - Während die Seitenverkleidungen den Spritverbrauch um 1,5 Liter auf 100 km senken sollen, können Heckklappen den Spritverbrauch um 3,5% reduzieren (Jesgulke, 2017) Der Hersteller des Teardrop Trailers beziffert mögliche Kraftstoff-Einsparungen mit bis zu 11% (Don-Bur (Bodies & Trailers), o. D.).		- Die Auswahl an bereits marktreifen Produkten ermöglicht eine schnelle Anwendung, um den Kraftstoffverbrauch zu reduzieren. - Flottenbetreiber können sowohl herkömmliche Lkws beispielsweise mit Seitenverkleidungen und Heckklappen nachrüsten, aber auch in aerodynamisch angepasste Fahrzeugmodelle investieren.	
Schwächen		Risiken	
- Die Effizienzsteigerung ist stark abhängig von der Fahrgeschwindigkeit des Lkws. So können Einsparungen am besten in hohen Geschwindigkeiten realisiert werden (Paschotta, o. D.). - Eine aerodynamisch relevante Geschwindigkeit wird erst ab 60kmh erreicht (Indinger & Devesa, 2012). - Der Luftwiderstand hat einen geringeren Einfluss auf bergigen Strecken. Dies betrifft sowohl die Autobahn als auch die Landstrasse (Frank, 2012).		- Der Hersteller der Teardrop Trailer besitzt ein Patent auf die entwickelte Form. Dieses Monopol kann jedoch zu einer Verlangsamung der Verbreitung führen. - Rechtliche Anpassungen können weitere Umsetzung verlangsamen.	

Anbieter

WABCO



WABCO

- Der US-amerikanische Automobilzulieferer bietet eine breite Produktpalette an. Darunter fällt auch seine OptiFlow Produktreihe. Diese beinhaltet Heckklappen, Seitenverkleidungen und Verkleidungen für den Zwischenraum von Zugmaschine und Anhängerfahrzeug.
- Alle OptiFlow Produkte können als Nachrüstung an bereits verwendete Lkw montiert werden.
- Sie sind leicht zu installieren, erfordern keine zusätzliche Wartung und haben eine lange Lebensdauer. Neben der verbesserten Effizienz kann auch die Fahrstabilität verbessert werden (WABCO Holdings, 2020).



Don-Bur

- Don-Bur ist eine britische Firma die Lkw Anhänger verkauft. 2006 hat die Firma den Teardrop Trailer entworfen, der ein kurvenförmiges Dach aufweist, welches die Aerodynamik des Anhängers deutlich verbessert. Diese Form hat sich die Firma 2014 patentieren lassen.
- Der Hersteller gibt eine Kraftstoffeinsparung von bis zu 11% an (Don-Bur (Bodies & Trailers), o. D.).

DAIMLER

Daimler AG

- 2019 hat Daimler den neuen Actros eingeführt, dessen Design anhand von Versuchen im Windkanal optimiert wurde. So besitzt die Sattelzugmaschine keine Seitenspiegel mehr, sondern nur noch eine Mirror Cam (Jesgulke, 2017).
- Durch die aerodynamischen Anpassungen und weitere Verbesserungen des Tempomaten und der Predictive Power Train Getriebesteuerung sollen bis Einsparungen von bis zu 15% erzielt werden können im Vergleich zum Vorgängermodell von 2011 (Burkhart & Pfeifle, 2020).



Pilotprojekte



Name des Projekts	«AEROFLEX»
Dauer des Projekts	10/2017 – 03/2021
Projektvolumen	11,8 Mio. € davon 9,5 Mio. € aus EU-Förderung
Projektrahmen und -partner	DLR, MAN, Volvo, Scania, Iveco, Daf, Schmitz Cargobull, Michelin, TNO, Fraunhofer, TML, IDIADA, und mehr
Testfeld	
Datenbasis	Das Projekt greift auf das Wissen der Praxispartner zurück, um neue Konzepte und Technologien zu entwickeln.
Vorläufige Ergebnisse	Rechtliche Rahmenbedingungen, die den Zugang zu smarter Infrastruktur regulieren sind von grosser Bedeutung. Ziel ist es Standards für aerodynamische und flexible Lkw zu veröffentlichen und so verbesserte Effizienz und neue Logistikservices zu ermöglichen. Use Cases für die Abschätzung der Konsequenzen wurden bereits identifiziert, werden aber erst nach Ende der Projektlaufzeit veröffentlicht.

(Lischke, o. D.; Community Research and Development Information Service, 2020)



Name des Projekts	Teil der «Go Green» Strategie der Post
Dauer des Projekts	2017 - heute
Projektvolumen	/
Projektrahmen und -partner	DHL Freight
Testfeld	Tägliche Operations
Datenbasis	/
Ergebnisse	Um den Kraftstoffverbrauch seiner Lkw Flotte zu reduzieren hat die DHL Freight 1.300 Teardrop Trailer erstanden und dem Praxistest unterzogen. CEO von DHL Freight kann Kraftstoffeinsparungen von bis zu 10% in der Benutzung der kurvig geformten Anhänger bestätigen. Ein weiteres Projekt in Belgien testet die Anwendung von Boat Tails an fünf exemplarischen Lkws. DHL rechnet hier mit Einsparungen von mindestens einem Liter auf 100 km und erwartet eine Amortisation nach der halben Lebensdauer des Anhängers. Weitere Anhänger mit Boat Tails sind bereits geordert. Beides sind Massnahmen, die zur Umweltstrategie des Konzern beitragen, welche eine CO2 Reduktion von 50% von 2007 bis 2025 visiert.

(Eschmeier, 2017)

CO₂-Einsparpotenzial

-

Betriebswirtschaftlicher Mehrwert

Betriebswirtschaftliche Kosten für Side – Wings

Kostenaspekte

- Anschaffungskosten bei Neukonfiguration/ Nachrüstkosten
- Betriebskosten/-einnahmen
- Break-even Point (Gewinnschwelle)

Beispielrechnung der Kosteneinsparung durch Side - Wings

$$\text{Break-Even-Point: } 3'000 \text{ Euro} = \frac{1,20 \text{ Euro}}{\text{Liter}} * \frac{30 \text{ Liter}}{100 \text{ km}} * 100'000 \text{ km} * 5\% * x$$

Der Break-Even-Point ist bei $x = \text{in Jahre}$ erreicht

(Preis ist eine Schätzung basierend auf vorherig öffentlichen Preisen der Einzelkomponenten)

Berechnung des «Break-even Points»

- Anschaffungskosten der Seitenverkleidung pro Lkw: rund 3'000 Euro (WABCO Holdings, o. D.-a)
- Laufzeit 100'000km pro Jahr
- 30 l/100km
- Einsparung von 1,5 Liter pro 100 km (entspricht 5%)
- Kraftstoffpreis in DE (1,20Euro/ Liter)

- Durch die Seitenverkleidung wird 1'800 Euro pro Jahr weniger für Diesel ausgegeben
- Die Mehrausgaben für die Technik wären nach 1,6 Jahren wieder eingespielt.

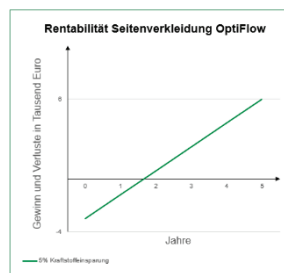


Abbildung 28: Rentabilität Seitenverkleidung Optiflow (eigene Darstellung)

Betriebswirtschaftliche Kosten für Boat Tails

Kostenaspekte

- Anschaffungskosten bei Neukonfiguration/ Nachrüstkosten
- Betriebskosten/-einnahmen
- Break-even Point (Gewinnschwelle)

Beispielrechnung der Kosteneinsparung durch Boat Tails

$$\text{Break-Even-Point: } 2'500 \text{ Euro} = \frac{1,20 \text{ Euro}}{\text{Liter}} * \frac{30 \text{ Liter}}{100 \text{ km}} * 100'000 \text{ km} * 3,7\% * x$$

Der Break-Even-Point ist bei $x = \text{in Jahre}$ erreicht

(Preis ist eine Schätzung basierend auf vorherig öffentlichen Preisen der Einzelkomponenten)

Berechnung des «Break-even Points»

- Anschaffungskosten der Heckklappen pro Lkw: rund 2'500 Euro (WABCO Holdings, o. D.-b)
- Laufzeit 100'000km pro Jahr
- 30 l/100km
- Einsparung von 1,1 Liter pro 100 km (entspricht 3,7%)

- Durch die Seitenverkleidung wird 1'320 Euro pro Jahr weniger für Diesel ausgegeben
- Die Mehrausgaben für die Technik wären nach 1,9 Jahren wieder eingespielt.



- Kraftstoffpreis in DE (1,20Euro/ Liter)

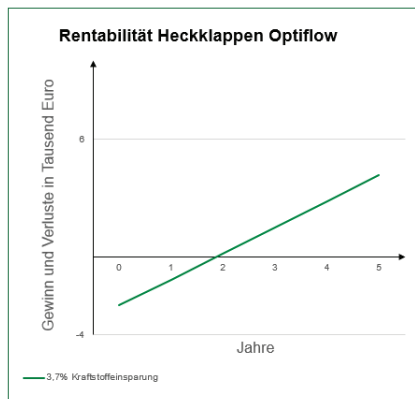
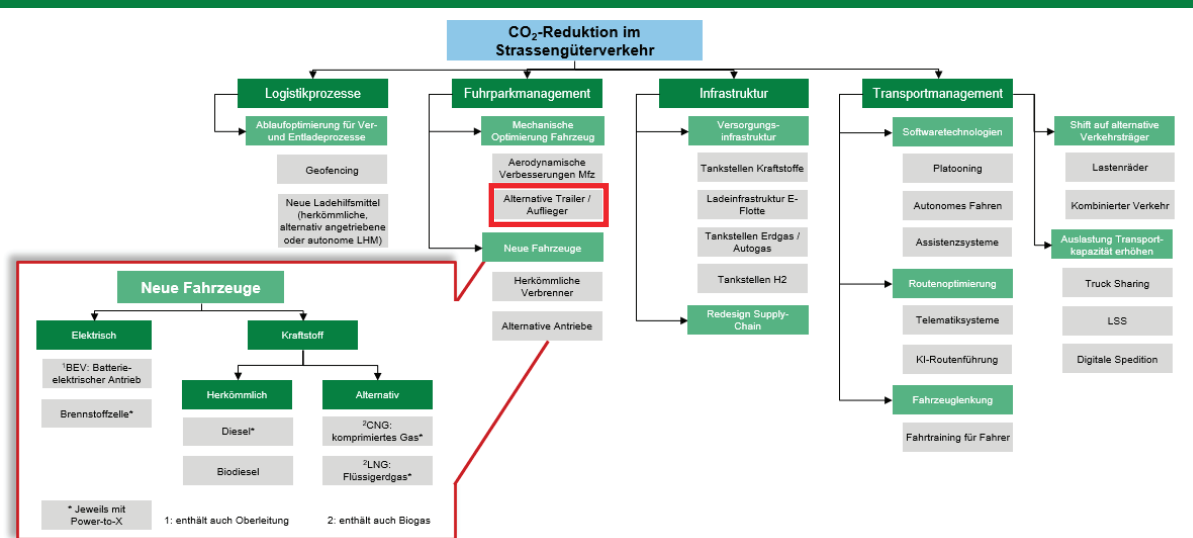


Abbildung 29: Rentabilität Heckklappen Optiflow (eigene Darstellung)

Alternative Trailer / Auflieger

Verortung der Massnahme im Cluster



Definition

Alternative Trailer und Auflieger sind insbesondere Trailer mit reduziertem Eigengewicht. Allerdings sind die Innovationen bezüglich des Trailers weitreichender als eine reine Gewichtsreduktion. Neue Angebote beinhalten ebenso Telematik Systeme, Reifendruck Kontrollsysteme und elektronische Achssteuerungssysteme. (DVZ, 2020)

Funktionsweise

Das Gewicht eines Trailers kann über verschiedene Wege vermindert werden und beinhaltet auf einer materiellen Ebene häufig den Einsatz von Metalllegierungen.

Ansätze der Umgestaltung beinhalten ganzheitliche Strategien, die sich mit der gesamten Architektur des Anhängers auseinandersetzen, aber auch das Neudesign von einzelnen Komponenten (Galos et al., 2014)

Telematik Systeme ermöglichen unter anderem eine GPS-Verfolgung und Temperaturüberwachung der Ladung. Mit einem Sensor an der Tür können auch Ladezeiten und Öffnung des Frachtraums überwacht werden (Dreher, 2010).

Ein zu niedriger Reifendruck erhöht den Kraftstoffverbrauch und die Unfallgefahr, sodass eine vereinfachte Überwachung zu Effizienzsteigerungen führen kann. Dies wird durch Reifendruck Kontrollsysteme ermöglicht, die als einzelnes System verwendet werden können oder als Bestandteil eines Telematik Systems (SKF Group, o. D.).

Marktreife

Erste Ideen und Visionen

Vollständige kommerzielle Implementierung



Verschiedene Hersteller arbeiten bereits seit Jahren an der Gewichtsoptimierung ihrer Produkte. So bietet die Firma Kögel ein LightPlus Modell mit einem Gewicht von 4,8 Tonnen, welches bereits 2018 auf der IAA vorgestellt wurde (Kögel Trailer, o. D.).

Auch Berger ecotrail verfolgt mit seinen ecotrail Anhängern eine Effizienzsteigerung durch Leichtbau. Der neuste Sattelaufliieger bringt lediglich 4,7 Tonnen auf die Waage (Berger Fahrzeugtechnik, o. D.).

Verbreitungsgrad

Niedrig

Hoch



Umsetzungen einer leichteren Bauweise sind keine Neuigkeit und schon seit den 2000er Jahren auf dem Markt etabliert. Der Compositrailer, der 2000 auf den belgischen Markt gebracht wurde, kann jedoch als einer der ersten relevanten Ansätze gesehen werden (Galos et al., 2014). Die Verbreitung ist daher keine Seltenheit, doch entwickeln sich die Standards schnell weiter. Auch Telematiklösungen besitzen bereits Marktreife. Ihre Verbreitung bei Firmen mit einer Flotte von mehr als 100 Fahrzeugen liegt bei 50%. Anders ist die Situation bei kleineren Firmen, nur circa 10% von ihnen verwenden



Auch Telematik Systeme besitzen bereits Marktreife und werden in einigen Modellen schon standardmässig verbaut (VerkehrsRundschau, 2020).

aktuell Telematik-Systeme (Wolf, 2018).

SWOT-Analyse

Stärken

- Eine Gewichtsreduktion kann einen Beitrag zu einer höheren Effizienz leisten. So haben Untersuchungen eine Gewichtsreduktion von 30% bei zweistöckigen Anhängern mit Einsparungen von 2% des Kraftstoffverbrauchs beziffert (Galos et al., 2014).
- Während Telematik Systeme durch Überwachung der Temperatur und des Reifendrucks auch eine Effizienzsteigerung mit sich bringen können, kann sich die Wirtschaftlichkeit auch durch den darin resultierenden Diebstahlschutz erhöhen (Dreher, 2010).
- Der richtige Reifendruck senkt nicht nur den Kraftstoffverbrauch, sondern auch das Unfallrisiko. Ausserdem können die Reifen länger gebraucht werden, was die Gesamtkosten verringern kann (SKF Group, o. D.).

Schwächen

- Telematik Systeme bedeuten eine erhöhte Komplexität, mit der auch häufig eine höhere Störanfälligkeit einhergeht (Wolf, 2018).

Chancen

- Flottenbetreiber haben bereits heute eine vielfältige Auswahl an marktreifen Produkten, die sowohl ein Nachrüsten bestehender Trailer ermöglichen als auch Investitionen in neue innovative Auflieger anbieten.
- Verbesserte Transporteffizienz liegt auch im Allgemeininteresse, sodass Deutschland ab Januar 2021 Investitionen in Telematik Systeme, Reifendruckkontrollsysteme und elektronische Achssteuerungssysteme fördern wird. Das Programm hat ein Volumen von 500 Mio. Euro (DVZ, 2020).
- Telematik Systeme können in Zukunft auch zu Notfallsystemen werden und im Ernstfall Daten an Rettungskräfte weiterleiten (Wolf, 2018).

Risiken

- Datenschutz eines Telematik Systems ist von enormer Bedeutung, sodass nur berechtigte Personen auf die Daten zugreifen können. Insbesondere die rechtlichen Rahmenbedingungen hinsichtlich des Datenschutzes müssen geklärt sein, denn Arbeitnehmer können Fahrer durch das System zu einem gewissen Anteil überwachen (Wolf, 2018).

Anbieter



Berger ecotrail

- Die österreichische Firma aus Radfeld hat sich auf den Leichtbau von Trailern spezialisiert.
- Der Berger ecotrail Auflieger bringt ein Eigengewicht von 4,7 Tonnen auf die Waage und setzt damit einen neuen Standard auf dem Markt.
- Dadurch wird laut Hersteller über eine Tonne weitere Nutzlast ermöglicht, Kosten für Treibstoff und Verschleiss sinken.

(Berger Fahrzeugtechnik, 2012).



Kögel

- Auch die deutsche Firma Kögel setzt auf minimiertes Eigengewicht bei ihren Trailern.
- Der Kögel Light plus besitzt ein Leergewicht von 4,8 Tonnen, welches durch einen Stahl-Leichtbau und den Einsatz von Aluminium erreicht wird. Weitere individuell wählbare Sonderausstattung kann das Gewicht zusätzlich reduzieren.
- Dadurch kann die Nutzlast um mindestens 850 kg erhöht werden und der Kraftstoffverbrauch sinkt um 0,6 Liter pro 100 km laut eigenen Angaben.

(Kögel Trailer, o. D.).



SKF

- Die schwedische Firma SKF bietet Reifendruck Kontrollsysteme an, die eine nachträgliche Ausrüstung durch einfache Installation ermöglichen.
- Dabei wird jedes Rad mit einem kleinen Modul ausgestattet, welches Druck und Temperatur misst und an die elektronische Kontrollunit sendet. Der Fahrer kann diese Daten über ein Display im Fahrerhaus in Echtzeit verfolgen.

(SKF Group, 2015).



Schmitz Cargobull

- Mit dem Trailer Connect bietet der deutsche Hersteller ein Telematik System für seine Auflieger an.
- Während dieses bereits den Standard für seine Kühlsattelkoffer darstellt, wird das System ab 2021 auch serienmässig in den Sattelcurtainsider eingebaut.
- Es beinhaltet Temperaturüberwachung, Positionsdaten und die Kontrolle von Reifendruck und Türverschluss.
- Damit kann die Unfallgefahr gesenkt werden, Reparaturen proaktiv geplant werden, während die Effizienz verbessert wird.
- Daten können über das Trailer Connect Portal konsolidiert werden oder in ein weiteres System eingespeist werden.



Auch eine App wurde entwickelt, mit der dem Fahrer eine einfache und bequeme Überwachung des Reifendrucks ermöglicht wird.

(Schmitz Cargobull, 2020)



TIP

- Die niederländische Leasinggesellschaft TIP hat ein Telematik System entwickelt, das auch als Nachrüstung in Trailer aller Marken eingebaut werden kann.
- Es sammelt Daten zur Position, Temperatur, Türsicherheit und dem Reifendruck. Ausserdem kann damit die Bremsleistung überwacht werden.
- Auch TIP ermöglicht die Betrachtung der konsolidierten Daten in einer Plattform namens Fleet Connected.
- Die Lösung soll zu einem effizienteren und sichereren Betrieb führen.

(TIP Trailer Services Germany, 2020)

Pilotprojekte



Name des Projekts	Studie über wirtschaftliche und ökologische Vorteile von nutzlastoptimierten Fahrzeugen im Lkw Verkehr
Dauer des Projekts	03/2012
Projektvolumen	-
Projektrahmen und -partner	K+P Transport Consultants, hwh Gesellschaft für Transport und Unternehmensberatung mbH, im Auftrag der Berger Fahrzeugtechnik GmbH
Testfeld	228 km lange Strecke in Thüringen (Autobahn, Bundes- und Landstrassen)
Datenbasis	18 Fachgespräche, eigene Fahrversuche
Vorläufige Ergebnisse	Als untersuchtes Trailerexemplar wurde der Ecotrailer von Berger verwendet. Der Kraftstoffverbrauch kann um durchschnittlich 1,52 Liter auf 100 km gesenkt werden, wenn die Nutzlast nicht komplett verwendet wird. Betrachtet man eine gegebene Warenmenge kann die Anzahl der Fahrten um circa 7% gesenkt werden. Diese Vorteile sind bereits realisierbar und erfordern keine Anpassung der rechtlichen Rahmenbedingungen.

(Kienzler et al., 2012)

Betriebswirtschaftlicher Mehrwert

Betriebswirtschaftliche Kosten für Berger Ecotrailer

Kostenaspekte

- Anschaffungskosten bei Neukonfiguration/ Nachrüstkosten
- Betriebskosten/-einnahmen
- Break-even Point (Gewinnschwelle)

Beispielrechnung der Kosteneinsparung durch Kögel Light Plus

$$\text{Break-Even-Point: } 6'000 \text{ Euro} = \frac{1,20 \text{ Euro}}{\text{Liter}} * \frac{30 \text{ Liter}}{100 \text{ km}} * 100'000 \text{ km} * 5\% * x$$

Der Break-Even-Point ist bei $x = \text{in Jahre}$ erreicht

Berechnung des «Break-even Points»

- Mehrkosten für einen Ecotrailer anstelle eines konventionellen Trailers: 6'000€ (M. Ley, E-Mail, 3. März, 2021)
- Laufzeit 100'000km pro Jahr
- 30 l/100km
- Einsparung von 1,5 Liter pro 100 km (entspricht 5%), wenn die Gewichtseinsparung nicht durch zusätzliche Nutzlast ausgeschöpft wird (Kienzler et al., 2012)
- Kraftstoffpreis in DE (1,20Euro/ Liter)
- Durch den Einsatz von Ecotrailern wird weniger Kraftstoff verbraucht, sodass bereits nach gut 3,3 Jahren der Break-Even-Point erreicht ist.

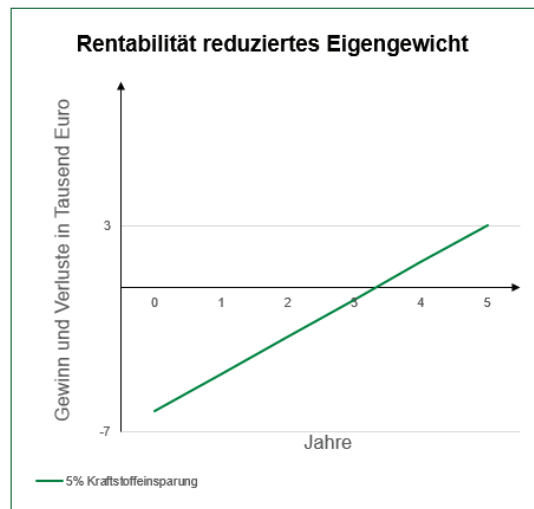
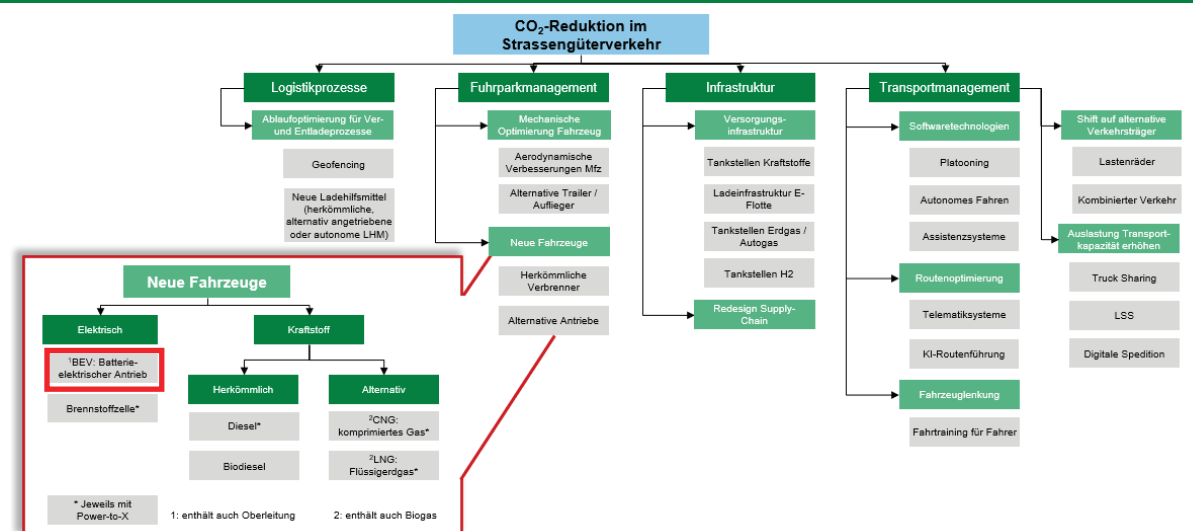


Abbildung 30: Rentabilität Berger Ecotrailer (eigene Darstellung)

11.3.2.2 Neue Fahrzeuge

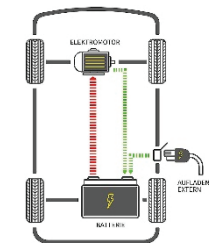
BEV: Batterie-elektrischer Antrieb

Verortung der Massnahme im Cluster



Definition

In diesen Bereich fallen Fahrzeuge, welche mit einem Elektromotor angetrieben werden, der seine Energie über eine Batterie bezieht. Die Batterie wird über Ladestation geladen, die an das Stromnetz angeschlossen ist.



Batterieelektrisches Auto

Abbildung 31: Batterieelektrisches Auto (Deutsche Energie-Agentur GmbH, o.D.)

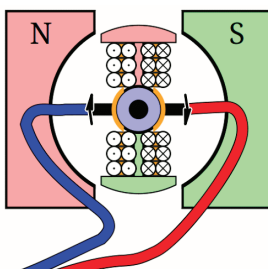


Abbildung 32: Aufbau eines Elektromotors (Günter Pauli GmbH, 2017)

Funktionsweise

Elektromotor wandelt elektrische Energie in mechanische Energie um

Nutzung des Magnetismus: nichtmagnetische Teile werden mit elektrischem Strom magnetisiert

Im Elektromotor sind zwei zentrale Bestandteile: fester magnetischer Teil (Stator) und beweglicher Teil (Rotor), der durch Strom magnetisiert wird

Durch die elektrische Aufladung sind die gleichgeladenen Pole einander zugewandt und stossen sich ab, Rotor bewegt sich

Bei jeder halben Umdrehung wechselt die Stromrichtung und damit die magnetische Ausrichtung des Rotors

Rotor bewegt sich durch ständiges Ändern der Stromrichtung weiter (Günter Pauli GmbH, 2017).

Marktreife		Verbreitungsgrad	
Erste Ideen und Visionen	Vollständige kommerzielle Implementierung	Niedrig	Hoch
BEV-Pkw werden bereits viele serienproduzierte Modelle angeboten, BEV-Lkw sind aktuell auf der Schwelle zur breiten Serienproduktion. Erst einige wenige Hersteller bieten serienproduzierte Modell auf dem Markt an. Herausforderung bestehen hinsichtlich Batterie und Nutzlast der Fahrzeuge (teure Herstellung, Ladezeit und Reichweite)		In Deutschland gibt es (Stand 2019) 15'678 elektrische Nutzfahrzeuge (Werwitzke, 2019). Diese Zahl ist seit dem Jahr 2016, in welchem es 7.310 Ladestationen gab, stark gewachsen. Ladestationen sind in Deutschland 20.400, in der Schweiz 7.000 und in Österreich 5'000 vorhanden. Diese Zahlen beziehen sich allerdings auf Ladestationen für Pkw (Laiva, 2020; ÖAMTC, o. D.)	
SWOT-Analyse			
Stärken - Geringe Lärmemissionen, dadurch gute Eignung im Stadtverkehr - Geringere lokale Feinstaubemissionen (nur durch Reifen- und Bremsantrieb) - Niedrigere Kosten für Betrieb, Unterhalt und Wartung verglichen mit einem Diesel-LKW		Chancen - Benzinpreise steigen stärker als Strompreise - Preise für Batterien sinken stark, Kapazität steigt. - Schonung von fossilen Ressourcen (Erdöl, Erdgas) - Mithilfe von elektrischen Oberleitungen kann das Problem der begrenzten Batteriekapazität gelöst werden, austauschbare Akkus gegen lange Ladezeit - CO₂-freies Fahren bei Strommix aus erneuerbaren Energien möglich	
Schwächen - Reichweite für längere Strecken zu gering, Grund hierfür ist geringe Energiedichte von Akkus - Lange Ladezeiten - Hoher Anschaffungspreis - Niedrigere Nutzlast im Vergleich zum Diesel (Schwere Akkus)		Risiken - Der Anteil des Ladestroms aus erneuerbaren Energien ist zu gering, um Elektrofahrzeuge ökologischer zu machen - Konkurrenz durch andere innovative Technologien (Höhne et al., 2012; Deutsche Energie-Agentur, o. D.) - Temporäre Engpässe bei Rohstofflieferung (z.B. Kobalt) (Thielmann et al., 2020)	



Anbieter (BEV)



Volvo

- FL Electric ist erster vollelektrisch betriebener LKW des Autobauers
- Vor allem im innerstädtischen Lieferverkehr und Abfallwirtschaft unterwegs
- 6 Tonnen Gesamtgewicht, bis zu 300km Reichweite
- Ladedauer 2h (Gleichstrom) bis 10h (Wechselstrom)

(Butter, 2020; Schatzmann, 2019)



Renault Z.E. Serie

- Zweite Generation E-LKW des französischen Autobauers
- Einsatz in Stadtverkehr, Warenlieferung und Abfallentsorgung
- 3,5 bis 26 Tonnen, bis zu 300km Reichweite
- Rund 12h Ladedauer in Starkstromsteckdose

(Butter, 2020)



Tesla

- Tesla Semi Truck soll 2021 auf den Markt kommen
- Bei 40t Reichweite von 800km, mit Supercharger in 30min Hälfte des Akkus ladbar
- Hinsichtlich Nutzlast bisher keine Angaben, vermutlich geringer wegen grossen Batterien
- Vielfältige Einsatzmöglichkeiten durch grosse Reichweite

(Butter, 2020)

Pilotprojekte (BEV)



Modell	Designwerk Winterthur
Einsatz	Müllabfuhr
Reichweite	150 km
Gewicht	26 Tonnen
Zeitraum	Seit 2017
Leistung Elektromotor	760 PS
Kapazität Batterie	k.A.
Inhalt	Die Firma Designwerk aus Winterthur informiert über den schweizweit ersten 26t Elektro-LKW. Der Elektro-LKW dient der Kehrlichtlogistik. Die Elektro-LKW helfen, den innerstädtischen Lärm sowie die Schadstoffemissionen zu verringern. Der Elektro-LKW hat die Vorteile, dass er schneller beschleunigt und dass beim Bremsen Energie zurückgewonnen wird. Finanziell profitiert der Elektro-LKW vom Wegfall der LSVA. Erkenntnisse aus diesem Projekt sollen in die Produktion einer Kleinserie einfließen.

(Ammann, 2017)



Modell	k.A.
Einsatz	Getränkeverteilung, Unternehmen Feldschlösschen
Reichweite	100-200km
Gewicht	26 Tonnen
Zeitraum	2020
Leistung Elektromotor	k.A.
Kapazität Batterie	k.A.
Inhalt	Das Unternehmen Feldschlösschen hat sich als Ziel gesetzt, bis 2030 CO ₂ -neutral zu sein. In den letzten 5 Jahren konnte es bereits den CO ₂ -Ausstoss um 21% senken. Um die Ziele zu erreichen, werden 20 Elektro-LKW eingesetzt. Für die Verteilung wird auch viel auf den Bahnverkehr gesetzt. Die Elektro-LKW werden vor allem in der Feinverteilung eingesetzt.

(Feldschlösschen, 2020)



Pilotprojekte (BEV)



Modell	Scania R 450 Hybrid
Einsatz	Schwerverkehr
Reichweite	Ohne Oberleitung 10-15 km
Gewicht	26 Tonnen
Zeitraum	Seit 2019
Leistung Elektromotor	177 PS
Kapazität Batterie	7,4 kWh
Inhalt	In dem seit Mai laufenden Projekt fahren LKW mit Elektromotor, die mit Strom aus Oberleitungen versorgt werden. Das Projekt findet auf einer der meistbefahrenen Autobahnstücke Deutschlands, der A5. Ziel ist es, Daten zu sammeln, die für einen potenziellen Ausbau des Systems relevant sein können. Motivation für den Ausbau von Oberleitungen ist, das Problem der schweren und trotzdem nur über eine begrenzte Kapazität verfügenden Batterie zu lösen. Die Hybrid-LKW fahren im Normalbetrieb mit Diesel. Sobald sich allerdings eine elektrische Oberleitung auf der Fahrbahn befindet, wird auf elektrischen Betrieb umgeschaltet.

Abbildung 33: Elektro Lkw angeschlossen an einer Oberleitungsanlage (Finke, 2020)

(Ecomento, 2019; Finke, 2020; Die Welt, 2019)

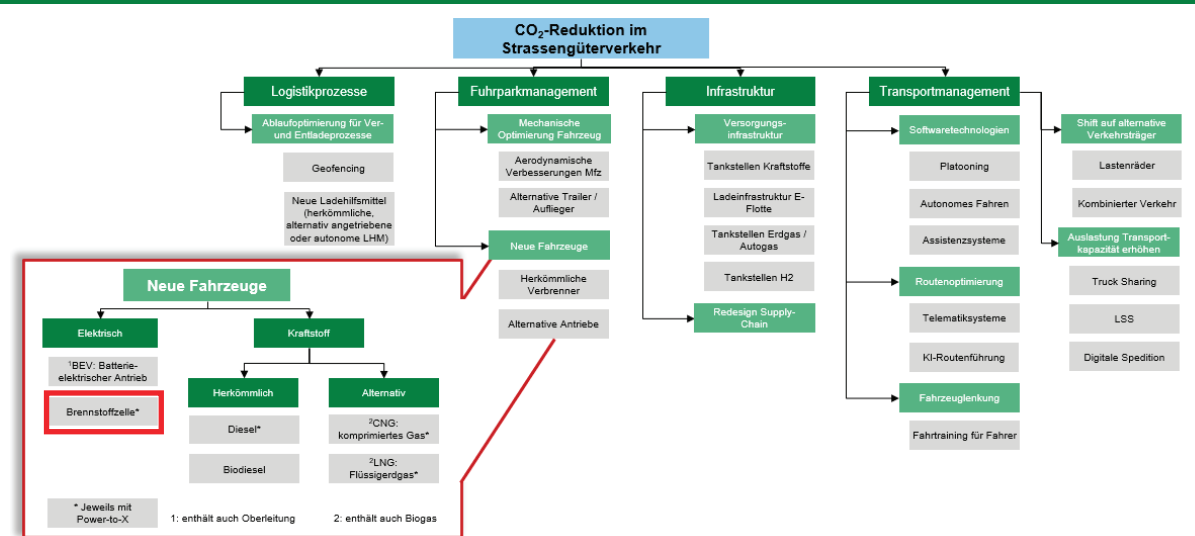
MEYER&MEYER
since 1902

Modell	Meyer & Meyer
Einsatz	Spedition
Reichweite	200 km
Gewicht	19t
Zeitraum	2019/2020
Leistung Elektromotor	k.A.
Kapazität Batterie	k.A., Gewicht von 4000kg
Inhalt	Um die langen Wartezeiten beim Stromtanken zu umgehen, wurden in diesem Projekt LKW mit austauschbaren Akkus gebaut. An der Speditionsroute von Meyer & Meyer wurden drei Batteriewechsellager errichtet. Dort werden die Batterien schonend aufgeladen und sind dann rechtzeitig zum Wechsel bereit. Der Wechsel der Batterien dauert weniger als 15 min. Mit einem Gabelstapler werden die Batterien ausgetauscht. Man rechnet bei dem Projekt mit Einsparungen von etwa 3,4 Tonnen CO ₂ pro Jahr.

(Ecomento, 2020; Bönnighausen, 2019; Kuther, 2020)

Brennstoffzelle

Verortung der Massnahme im Cluster



Definition

Brennstoffzellenfahrzeuge, sind Fahrzeuge, bei denen der Antrieb durch **elektrische Energie aus den Energieträgern Wasserstoff oder Methanol** durch eine Brennstoffzelle erzeugt wird (Chemie.de, o. D.). Die Energie wird dabei direkt in Bewegung umgewandelt oder zeitweise in einer **Traktionsbatterie** zwischengespeichert. Der elektrische Speicher ermöglicht zum einen die Rekuperation, zum anderen entlastet er die Brennstoffzelle von Lastwechseln. Diese Antriebsform ist noch experimentell und wird derzeit von den Automobilherstellern eher als **Zukunftstechnologie** favorisiert (Chemie.de, o. D.). Sie steht in der aktuellen Entwicklung in Konkurrenz zu Akkumulator-gepeisten Elektroantrieben. Die aus einem in der Breite eingeführten Wasserstoffantrieb resultierenden **Systemaspekte** wie beispielsweise der Aufbau einer Infrastruktur für die Herstellung, Speicherung und Betankung sind im Wesentlichen noch **offen** (Chemie.de, o. D.).

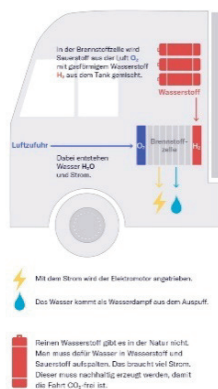


Abbildung 34: Funktionsweise einer Brennstoffzelle (Schmidt, 2020)

Funktionsweise

Einzelne Brennstoffzellen bestehen aus zwei Elektroden (Anode und Kathode), die durch eine wasserstoffundurchlässige Membran oder durch einen Elektrolyten voneinander getrennt sind (Bundesamt für Energie, o. D.).

Die Anode wird mit dem Brennstoff (z.B. Wasserstoff H₂) umspült, die Kathode mit dem Oxidationsmittel (Sauerstoff O₂) (Bundesamt für Energie, o. D.).

In der Zelle verbinden sich diese zu Wasser (H₂O) und aufgrund der elektrisch isolierenden Eigenschaften der Membran werden die Elektronen gezwungen über einen äusseren elektrischen Kreis zu gehen, wobei nun ein Gleichstrom fliesst. Gleichzeitig entsteht Wärme, welche genutzt werden kann oder über einen Kühler abgeführt werden muss (Bundesamt für Energie, o. D.).

Da eine einzelne Zelle nur eine geringe elektrische Spannung erzeugt, werden mehrere Zellen hintereinandergeschaltet, resp. gestapelt. Ein solcher Stapel wird als Brennstoffzellen-Stack bezeichnet (Bundesamt für Energie, o. D.).

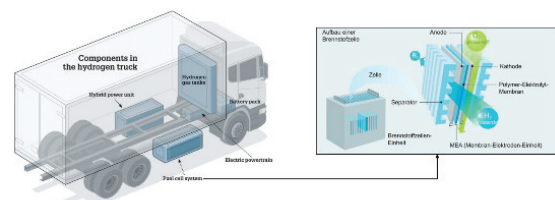


Abbildung 35: Aufbau und Lokalisation einer Brennstoffzelle (Scania, 2020a; Hüppi, 2019)



Marktreife (FCEV)		Verbreitungsgrad (FCEV)	
Erste Ideen und Visionen	Vollständige kommerzielle Implementierung	Niedrig	Hoch
			
Es sind erste Kleinserien in Produktion für Pilotprojekte. Diese Modelle werden für ausgewählte Feldversuche und Use Cases hergestellt und getestet. Generell liegen die Forschungs- und Entwicklungs-Aktivitäten aber im Lkw-Bereich deutlich hinter denen im Pkw-Bereich (Gnann et al., 2017).		Brennstoffzellenfahrzeuge haben durch die Klimadebatte verstärkt an Interesse gewonnen. Jedoch ist der Durchbruch noch nicht erreicht (Hommen, 2019). Dies liegt einerseits daran, dass Wasserstofffahrzeuge relativ teuer sind und es wenig Hersteller gibt (Vogel, 2021). Andererseits liegt es aber auch an der schlecht ausgebauten Tankstellen-Infrastruktur. So gibt es in Deutschland bisher nur 90 (Stand: 22.02.2021) (H2 Mobility Deutschland, o. D.) und in der Schweiz bisher nur 6 Ladestationen (Stand: 22.02.2021) (Förderverein H2 Mobilität Schweiz, o. D.) welche in Betrieb sind.	
SWOT-Analyse			
Stärken		Chancen	
- Mit einer Tankdauer von 8 bis 20 Minuten deutlich schneller als ein Elektro-Lkw (Hampel, 2020) - Es können hohe Reichweiten mit einer einzigen Wasserstoffladung erreicht werden. Reichweiten von bis zu 1'000 km sind von Herstellern wie Hyundai bereits angekündigt (Hampel, 2020)		- Laut Prognosen kann ein Absatz von 3% in 2030 und 25% in 2050 im Lkw Segment erwartet werden (Weichenhain et al., 2020) Skalierungseffekt werden die Kosten für Wasserstoffherzeugung, Brennstoffzellen und Wasserstofftanks reduzieren (Stegmaier, 2020)	
Schwächen		Risiken	
- Der Gesamtwirkungsgrad eines Brennstoffzellenfahrzeuges liegt bei etwa der Hälfte eines Elektrofahrzeuges (Baxter, 2020) - Tankstellen-Infrastruktur wird benötigt und muss neu geschaffen werden (Weichenhain et al., 2020) - Es wird erwartet, dass die Antriebstechnologie im Vergleich zu einem Diesel-Lkw mindestens 1 Tonne mehr Gewicht auf die Waage bringt (European Federation for Transport and Environment, 2017).		- Fahrzeuge sind stark abhängig vom Angebot und Ausbau von Tankstellen (Stegmaier, 2020) - H₂-Lkw nur deutlich umweltschonender als herkömmliche Diesel, wenn erneuerbare Energien für die H₂-Produktion eingesetzt werden (Weichenhain et al., 2020)	

Anbieter (FCEV)



Toyota & Hino

- Toyota und fünf weitere Unternehmen haben das **Joint Venture** namens **"United Fuel Cell System R&D"** gegründet
- Sie entwickeln gemeinsam mit Hino Motors einen Brennstoffzellen-Lkw, der eine Reichweite von 600 Kilometern haben soll
- Der Lkw ist 11 Meter lang und hat ein Gesamtgewicht von 25 Tonnen
- Der Antriebsstrang mit zwei Brennstoffzellen-Stacks stammt vom Toyota Mirai und wird für den Einsatz im Lkw hochskaliert

(Internationales Verkehrswesen, 2020a; Norddeutscher Rundfunk, 2019; Gomoll, 2020)



Hyundai & H2 Energy

- Die **Hyundai Hydrogen Mobility AG** ist eine Partnerschaft zwischen der Hyundai Motor Company und dem Schweizer Verein H2 Energy
- Das Projekt umfasst ein gesamtes Wasserstoff-Ökosystems inklusive Brennstoffzellen-LKW
- Strom für grünen Wasserstoff wird aus Wasserkraft oder Sonnenenergie gewonnen
- Die Nutzung der Fahrzeuge wird mit einem Pay-per-use System bezahlt
- Die 34,5 kg Wasserstoff an Bord des Lkw ermöglichen eine Reichweite von ca. 400 km dabei ist die Nutzlast vergleichbar mit einem Diesel Lkw gleicher Größe
- Produziert werden die Lkw in Südkorea.

(Internationales Verkehrswesen, 2020b; E4tech, 2018)



Daimler & Volvo

- Daimler und Volvo wollen in der zweiten Hälfte dieses Jahrzehnts schwere Brennstoffzellen-Nutzfahrzeuge für den Fernverkehr in Serie anbieten
- In 25 Jahren sollen fast alle Daimler-Laster mit Wasserstoffantrieb fahren
- **"Die Brennstoffzelle ist eine entscheidende CO₂-neutrale Lösung für Lkw im schweren Fernverkehr"**, erklärt Martin Daum, Vorstandsvorsitzender der Daimler Truck AG

(Gomoll, 2020)



Pilotprojekte (FCEV)



Brennstoffzellen Modell	Esoro
Einsatz	Coop (Einzelhändler in der Schweiz)
Reichweite	375-400 km
Gewicht	34 Tonnen
Zeitraum	Strassenzulassung seit 2017
Motorenleistung	250kW
Kapazität Batterie	120 kWh Li-Ion
Brennstoffzellen Dauerleistung	100 kW
Wasserstoff Kapazität	34,5 kg @ 350 bar
Einsatz	2019 kündigte der Schweizer Einzelhändler Coop den Einsatz seines ersten Wasserstoff-Lkws an. Mitte 2017 bekam das Fahrzeug eine Zulassung, seitdem hat der Brennstoffzellen-Lkw in einem geschlossenen Kreislauf in der Schweiz gezeigt, dass er die an ihn gestellten Anforderungen erfüllt. Eine mit erneuerbarem Strom erzeugte Wasserstofffüllung reichte für etwa 400 Kilometer, das Tanken dauerte rund zehn Minuten. Ein intelligentes Bezahlmodell soll den Schweizern die kostspieligen Wasserstoff-Transporter mit rund 400 Kilometer Reichweite schmackhaft machen: Der grosse Einzelhandelskonzern Coop kauft die Lkw nicht, sondern mietet sie zu einem Kilometerpreis, der dem eines Diesellasters entspricht.

(H2 Energy, 2017; Gomoll, 2020)



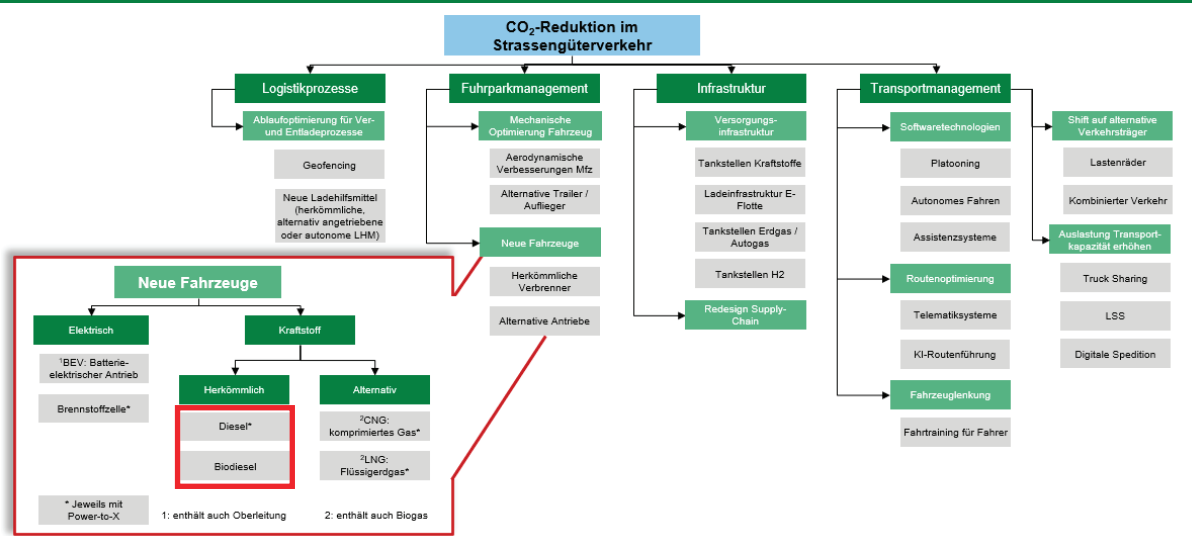
Brennstoffzellen Modell	Scania
Einsatz	Asko (Norwegischer Grosshändler)
Reichweite	400-500 km
Gewicht	27 Tonnen
Zeitraum	Pilotprojekt startete Januar 2020
Motorenleistung	210 kW
Kapazität Batterie	56 kWh Li-Ion
Brennstoffzellen Dauerleistung	90 kW
Wasserstoff Kapazität	33 kg @ 350 bar
Einsatz	2017 wurden beim norwegischen Grosshändler erstmals in Zusammenarbeit mit Scania Wasserstoff-Lkw eingeführt. Denn das Ziel von Asko ist es, langfristig ein klimaneutrales Unternehmen zu werden. Dabei wurde der Verbrennungsmotor der Lkw durch eine elektrische Maschine ersetzt, die mit Strom aus Brennstoffzellen und wiederaufladbaren Batterien betrieben wird. Der Wasserstoff wird dabei in einem umweltfreundlichen Prozess gewonnen, da lediglich Strom aus den Solarzellen, die sich auf den Dächern des Unternehmens befinden, eingesetzt wird. Gelagert werden pro Lastwagen 33kg bzw. 350 bar Wasserstoff, welche eine Reichweite von 400-500km ermöglichen.

(Scania, 2020b; Steffen, 2020)



Diesel

Verortung der Massnahme im Cluster



Definition

In diese Kategorie fallen Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren, welche mit Dieseldieselkraftstoffen betrieben werden. Die Dieseldieselmotoren werden vorrangig in schweren Fahrzeugen, aber auch PKW eingesetzt.

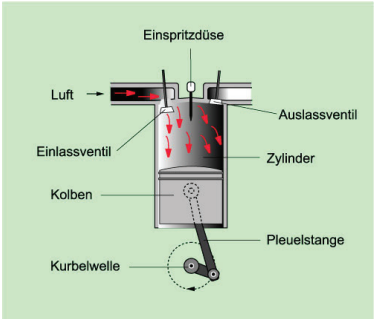


Abbildung 36: Aufbau eines Dieseldieselmotors (Duden, Learnattack, o.D.)

Funktionsweise

- Dieseldieselmotor arbeitet in vier Takt:
1. Durch geöffnetes Einlassventil gelangt Luft in den Zylinder. Durch den sich abwärts bewegendem Zylinder entsteht Saugwirkung
 2. Der Kolben bewegt sich aufwärts und verdichtet die Luft auf etwa 50 bar, die Temperatur steigt stark an. Kurz vor dem Totpunkt wird durch Einspritzpumpe Dieseldieselkraftstoff in den Zylinder gebracht
 3. Wegen der hohen Temperatur kommt es zu einer explosionsartigen Verbrennung des Dieseldiesel-Luft-Gemischs. Es ist keine Zündkerze erforderlich, man spricht von Selbstzündung. Infolge des entstehenden Drucks bewegt der Kolben sich nach unten. Die Hin- und Herbewegung des Kolbens wird über eine Pleuelstange in eine Drehbewegung umgewandelt.
 4. Der Kolben bewegt sich wieder nach oben und drückt durch das geöffnete Auslassventil die Verbrennungsgase aus dem Kolben. Danach geht es wieder mit Schritt 1 los (Duden Learnattack, o. D.)



Marktreife		Verbreitungsgrad	
Erste Ideen und Visionen	Vollständige kommerzielle Implementierung	Niedrig	Hoch
Die Technologie ist ausgereift. Potenzial / Verbesserungsbedarf nur hinsichtlich Umweltaspekten, Entwicklung von umweltfreundlichem Diesel. Biodiesel ist auch insofern marktreif, da es zumindest mit normalem Biodiesel vermischt am Markt erhältlich ist (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, o. D.). Synthetischer Diesel befindet sich hingegen noch im Forschungsstadium (Rudschies, 2019).		Diesel dominiert den LKW-Markt: mehr als 3 Millionen LKW in Deutschland, Marktanteil 94% Durch Wachstum anderer Antriebe sinkt Marktanteil, absolute Anzahl wächst aber weiterhin (Statista, 2020). In Deutschland wurden im Jahr 2019 Tonnen 2,275 Mio. Tonnen Biodiesel als Mischkraftstoff abgesetzt, der Anteil an reinem Biodiesel ist hingegen sehr gering (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2020).	
SWOT-Analyse			
Stärken • Sehr hohe Reichweiten (4000km) • kurze Tankzeiten • Relativ geringe Anschaffungskosten (vor allem verglichen zu BEV (Batteriekosten) und FCEV (Brennstoffzellenkosten)) • Infrastruktur ist vorhanden		Chancen • Mithilfe von Biodiesel kann der Dieselmotor umweltfreundlicher genutzt werden (vgl. Emissionen von Biodiesel aus Abfällen mit normalem Diesel) • Mithilfe von Power-to-X kann bei zukünftigem technologischen Fortschritt synthetisch umweltfreundlicher Diesel hergestellt werden (Power-to-Liquid) • Andere neuartige Technologien könnten sich aufgrund technischer Schwierigkeiten nicht durchsetzen	
Schwächen • Diesel-LKW verursachen hohe CO₂-Emissionen, ausserdem stossen sie Feinstaub und Stickoxide aus (Schadwinkel, 2019) • Verglichen mit anderen Energieträgern hohe Kilowattstundenpreise (vgl. Dieselpreise insbesondere zu Strompreisen) • Endlicher Rohstoff als Basis		Risiken • Strecken, auf denen Dieselfahrzeuge fahren dürfen, können wegen Stickoxidbelastungen abnehmen. Insbesondere für ältere Dieselnormen gibt es bereits Fahrverbote. (ADAC, 2019) • Politische Massnahmen, die Vorgaben hinsichtlich von CO₂-Emissionen machen, können den Einsatz von Diesel-LKW erschweren	
Exkurs Biodiesel			
<u>Definition Biodiesel:</u> • Biodiesel wird durch Veresterung von pflanzlichen oder tierischen Fetten und Ölen gewonnen. (Shell Switzerland, o. D.) Ein Grossteil wird des Biodiesels wird aus ölhaltigen Pflanzen gewonnen, ein kleinerer Anteil wird aus anderen öligen Ressourcen wie Abfällen von Lebensmitteln gewonnen (Lehman, o. D.)			
<u>Marktreife und Verbreitungsgrad:</u> • Es gibt bereits Angebote von Herstellern, die Lkw-Motoren herstellen, die speziell auf Biodiesel ausgelegt sind (Scania Schweiz, o. D.) • Reiner Biodiesel ist an Schweizer Tankstellen nahezu gar nicht verfügbar (Verband der Schweizerischen Biotreibstoffindustrie, o. D.), dasselbe gilt für Deutschland (BiomassMuse, o. D.)			
<u>Vorteile:</u> • Biodiesel wird aus nachwachsenden Rohstoffen gewonnen • Die Pflanzen entziehen vor der Verarbeitung zu Biodiesel der Luft das Treibhausgas CO₂			

Nachteile:

- Beim Anbau und der Verarbeitung der Pflanzen wird Energie benötigt. Diese stammt i.d.R. aus konventionellen Energieträgern
- Für den Anbau von Palmöl, der zu Biodiesel verarbeitet wird, werden grosse Flächen an Biodiesel gerodet (CosmosDirekt, o. D.) Berücksichtigt man dies in der CO₂-Bilanz, so verringert sich das Einsparpotenzial gegenüber Diesel auf 5% (Lichtblau, 2012)
- Der Einsatz von Biodiesel führt zu kürzeren Wartungsintervallen (Scania Schweiz, o. D.)

Exkurs Power-to-Diesel

Definition und Herstellung von synthetischem Diesel:

- Bei Power-to-X handelt es sich um Technologien, bei denen Treibstoffe synthetisch aus Wasser, CO₂ aus der Luft und Strom aus erneuerbaren Energien hergestellt wird. Mithilfe des Stroms aus erneuerbaren Energien wird per Elektrolyse Wasserstoff aus dem Wasser gewonnen. Dieser wird in einem weiteren Arbeitsschritt mit CO₂ verbunden. Daraus kann synthetischer Diesel, synthetisches Benzin oder synthetisches Gas gewonnen werden (Rudschies, 2019).

Marktreife und Verbreitungsgrad:

- Einige der Prozesse des Power-to-X befinden sich noch in der Entwicklungsphase (Kober et al., 2019)
- Power-to-Diesel-Kraftstoffe sind noch nicht an Tankstellen erhältlich.

Vorteile:

- Power-to-Diesel bietet die Möglichkeit eines klimaneutralen Treibstoffs
- Es können bestehende Infrastrukturen weiterverwendet werden

Nachteile:

- Der Wirkungsgrad über die Herstellung bis hin zum Verbrauch von Power-to-Diesel ist sehr gering (Randelhoff, 2019)
- Aktuell sind synthetische Kraftstoffe noch sehr teuer. Alleine die Herstellung kostet nach heutigem Stand 4.50€/Liter. (Rudschies, 2019)

Anbieter

DAIMLER

Daimler

- Weltmarktführer bei mittelschweren und schweren Lkw, 500'000 Lkw-Absatz (2018)
- Angebot von Lkw für Fernverkehr, Bauverkehr, Verteilerverkehr und Special Trucks
- Weltweiter Verkauf von speziell angepassten Modellen für Europa, Nordamerika, Asien, Indien

(Leitner & Laudan, 2019)



Volvo

- Zweitgrösster europäischer Lkw-Bauer, Platz 5 weltweit
- 176'000 zugelassene Lkw im Jahr 2017



(Nördinger & Pankow, 2016)

TRATON
GROUP

Traton

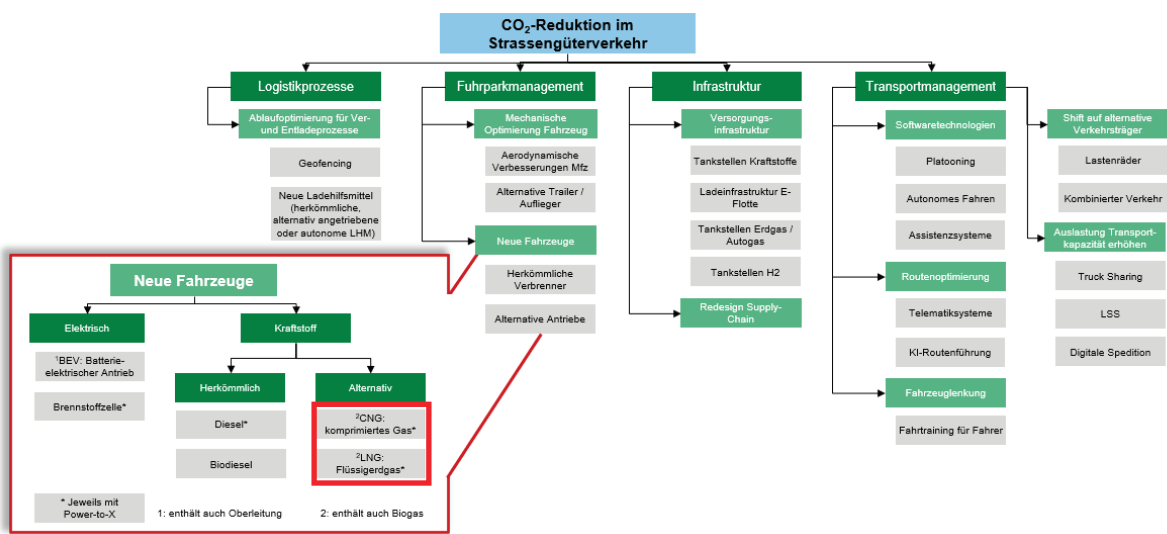
- Nutzfahrzeughersteller in Besitz der Volkswagen AG ist sechstgrösster Hersteller von Lkw
- Das Angebot umfasst Nutzfahrzeuge, Lkw und Busse
- 242'000 abgesetzte Fahrzeuge im Jahr 2019

(Tranton, 2020)



CNG, LNG und Power-to Gas

Verortung der Massnahme im Cluster



Definition

Die Fahrzeuge dieser Kategorie werden mit Erdgas, Biogas oder Power-to-Gas als Treibstoff betrieben. Das CNG (Compressed Natural Gas) wird unter hohem Druck in Tanks gespeichert. Das LNG (liquefied natural gas) ist verflüssigtes Erdgas, das in dieser Form auch im Tank gespeichert wird. Durch die flüssige Speicherung im Tank sind höhere Reichweiten möglich. Das Einsatzfeld von LNG liegt deswegen vor allem im Fernverkehr, das von CNG hingegen bevorzugt im Verteilerverkehr (Scania Deutschland, o. D.). Wird das Gas synthetische mithilfe von erneuerbaren Energien hergestellt, so spricht man von Power-to-Gas.

Funktionsweise

Funktionsweise im Prinzip wie beim Benzinmotor

Das unter sehr hohem Druck (200bar) gelagerte Erdgas wird über einen Hochdruckregler auf 5-7 bar verringert, bei LNG wird das verflüssigte Erdgas erwärmt und als unter Druck gesetztes Gas in den Motor eingespritzt

Gas gelangt über Niederdruckleitung in Motor, dort Vermischung mit Luft

Das Gemisch wird im Kolben verdichtet und mit einer Zündkerze entzündet

Die entstandene Bewegungsenergie wird über Pleuelstange letztendlich auf Getriebe übertragen (Fachverband Gas Wärme, o. D.)



Marktreife (CNG)		Verbreitungsgrad (CNG)	
Erste Ideen und Visionen	Vollständige kommerzielle Implementierung	Niedrig	Hoch
			
Es sind kommerzielles Angebot von CNG-LKW bereits vorhanden. Die Marktreife ist nicht in allen Segmenten erreicht. Vor allem in Liefer- und Verteilverkehr ist die Technologie marktreif.		Vereinzelte wird die Technologie in Branchen wie Lebensmitteltransporter, Paketdienst verwendet (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, o. D.). In Deutschland sind 853 (2020) Erdgastankstellen vorhanden, der Trend ist jedoch rückläufig (Gibgas - consulting/medien, o. D.). Die Anzahl an LNG-Tankstellen in Deutschland soll bis Ende 2020 40 betragen. Im Jahr 2018 wurden 1300 CNG- und LNG-LKW gefördert (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, o. D.-b).	
Marktreife (LNG)		Verbreitungsgrad (LNG)	
Erste Ideen und Visionen	Vollständige kommerzielle Implementierung	Niedrig	Hoch
			
Es sind kommerzielles Angebot von LNG-LKW bereits vorhanden. Die LNG-Technologie ist Marktreif (Neumann, 2020).		Die Verbreitung von LNG wächst stark. Im November 2020 hat die Zahl der Förderanträge zur Beschaffung von mit LNG betriebenen Lkw mit 4'000 einen neuen Höchststand erreicht. Der Gesamtanteil ist dennoch gering (Neumann, 2020). Die Anzahl an LNG-Tankstellen ist jedoch sehr gering (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, o. D.).	
Marktreife (Power-to-Gas)		Verbreitungsgrad (Power-to-Gas)	
Erste Ideen und Visionen	Vollständige kommerzielle Implementierung	Niedrig	Hoch
			
Die Marktreife von Power-to-Gas ist noch nicht erreicht worden. Synthetisches Erdgas ist noch zu teuer (Punkt4info, 2020). Verhältnismässig günstiges synthetisches Erdgas ist mit Geothermie möglich. Die Nordur Power SNG AG plant, synthetisches Erdgas in Island mit Geothermie herzustellen und in die Schweiz zu exportieren (ADAC, 2020).		Es gibt bisher nur Projekte für synthetisches Erdgas. Damit ist der Verbreitungsgrad also noch sehr gering.	



SWOT-Analyse (CNG und LNG)

Stärken

- CNG ist aufgrund steuerlicher Vergünstigungen günstiger als Diesel
- CNG und LNG weisen (etwas) geringere CO₂-Emissionen als Diesel auf.
- Mit LNG sind deutlich unter den alternativen Antrieben nach Diesel die höchsten Reichweiten möglich
- Hohe Marktreife, Schwierigkeiten liegen mehr im Ausbau der Infrastruktur als in der Technologiereife
- Relativ geringe Anschaffungskosten (vor allem verglichen zu BEV (Batteriekosten) und FCEV (Brennstoffzellenkosten))
- Infrastruktur ist vorhanden

Schwächen

- Begrenzte Infrastruktur vorhanden
- Kosteneinsparungen nur bei Nutzung in grösserem Umfang.
- Begrenzte Reichweite wegen geringem Energiegehalt pro Volumen für CNG
- CNG- und LNG-LKW teurer in Anschaffung als Diesel
- Transportkosten (Well-to-Tank) bei LNG hoch

Chancen

- Eine Verbesserung der Infrastruktur kann mehr Nutzer generieren
- Geringen Preis für CNG und LNG nutzen
- Technologische Potenziale: Verbesserte Verbrennung, um Methanschluß zu verringern und damit CO₂-Bilanz spürbar zu verbessern; Biogas & Power-to-Gas
- Mit Biogas kann THG-Bilanz spürbar verbessert werden, allerdings begrenzt vorhanden

Risiken

- Infrastrukturinvestitionen können überflüssig werden, wenn neue Technologien aufkommen; Deklaration als Übergangstechnologie
- Tiefe Ölpreise können das Interesse an alternativen Antrieben stören
- Andere Technologien, die umweltfreundlicher und nachhaltiger sind, können CNG und LNG verdrängen (Texas University Partnerships, o. D.)
- Ungewissheit der zukünftigen Subventionierung von CNG und LNG (VerkehrsRundschau, 2020)



Anbieter (CNG und LNG)



Scania

- Scania bietet mittelgrosse LKW mit Erdgasmotor an
- Scania P 280 gut für den Stadtverkehr geeignet. 280 PS
- Scania P/G CNG 340 mit 340 PS, 140kg Tank, geeignet für Verteiler – und Baustellenverkehr
- Scania G410 LNG mit 750 Liter Tank, Reichweite von bis zu 1600km, 410 PS

(Zukunft Gas e.V., o. D.-a; Zukunft Gas e.V., o. D.-b, CNG-Club, 2020)



Volvo

- Volvo FH LNG für schwere Regional- und Langstreckeneinsätze
- 460 PS, Tanks von 115kg bis 205kg
- Reichweite bis 1000km

(CNG-Club, 2020)



Iveco

- Iveco bietet eine Auswahl von LKW wahlweise als Ausführung in CNG oder LNG an
- Iveco Stralis Cursor 9 NP mit 400 PS, 540 kg Tankfüllung
- Für grosse LKW mit hohen Reichweiten mehr LNG-Antriebe als CNG

(CNG-Club, 2020)

Pilotprojekte (CNG)


IVECO

Einsatz	Aldi Süd
Reichweite	Bis zu 570km
Gewicht	Bis 26t
Zeitraum	Seit 2018
Motorenleistung	400 PS
Tank	130kg CNG
Inhalt	In einem Pilotprojekt werden 4 CNG-LKW von Iveco vor allem in mit Feinstaub belasteten Städten eingesetzt. Dies stellt eine Erweiterung eines Pilotprojekts mit einem einzelnen CNG-LKW in Mönchengladbach dar. Im Vergleich zu Diesel-LKW werden die CO ₂ -Emissionen um 16% gesenkt, Stickoxide um 70% und Feinstaub sogar um 99%. Hauptproblem für den Einsatz ist, dass sich nur wenige der 900 CNG-Tankstellen in Deutschland für Sattelzüge eignen.
Einsatz	Aldi Süd

(Niess, 2018)

Pilotprojekte (LNG)



Einsatz	Lidl, Krummen Kerzers
Reichweite	k.A.
Gewicht	k.A.
Zeitraum	Seit 2019
Motorenleistung	k.A.
Tank	k.A.
Inhalt	Lidl und Krummen Kerzers haben on Zusammenarbeit die ersten Schweizer LNG-Tankstelle eröffnet. Diese stehen in Weinfelden im Kanton Thurgau und in Sévaz. Die Errichtung dieser Tankstellen ist ein wichtiger Schritt für den erweiterten Einsatz von LNG. Denn trotz des hohen Reifegrades der Technologie ist die Verbreitung wegen der schlecht ausgebauten Infrastruktur noch sehr gering. Der Aufbau der Tankstellen ist Teil des Projektes «Goodbye Diesel – Hello LNG». Ausserdem sollen LNG-LKW angeschafft werden.

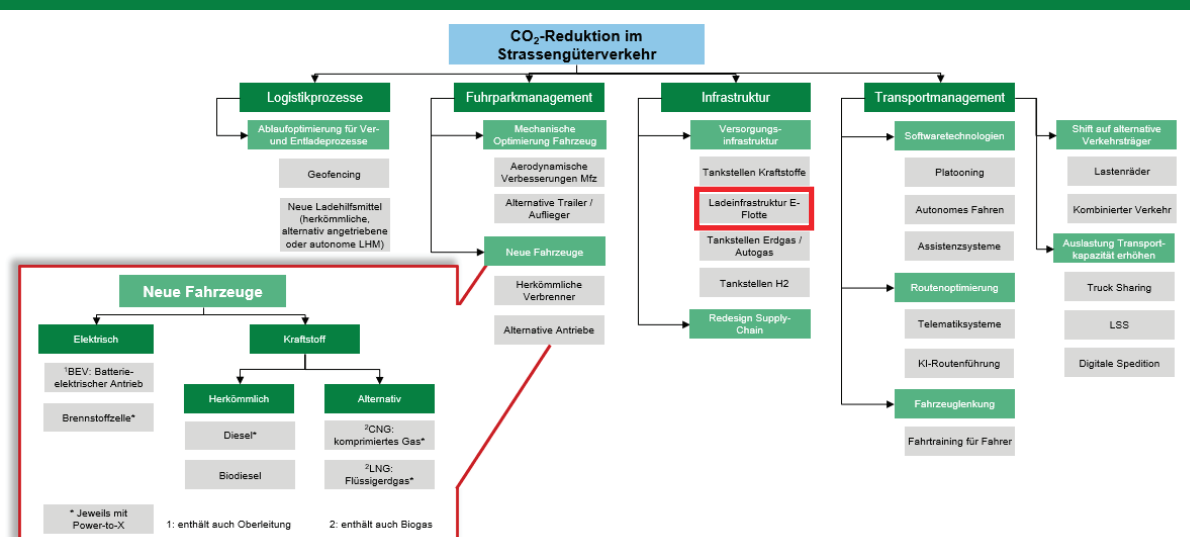
(Krummen Kerzers AG, 2019)

11.3.3 Infrastruktur

11.3.3.1 Versorgungsinfrastruktur

Ladeinfrastruktur E-Flotte

Verortung der Massnahme im Cluster



Definition

Für den Einsatz von BEV-Lkw im Schwerverkehr ist aufgrund der begrenzten Reichweite ein regelmässiges Nachladen im öffentlichen Raum, etwa an Bundesautobahnen notwendig. Die Leistungen von Ladestationen für Pkw reichen nicht aus, um Lkw innerhalb der gesetzlichen Pausenzeiten ausreichend aufzuladen (Plötz, et al., 2020).

Funktionsweise

Zum Aufladen kann sowohl Wechselstrom als auch Gleichstrom verwendet werden. Beim Laden mit **Wechselstrom** wird die elektrische Energie aus dem Wechselstromnetz unter Verwendung einer oder mehrerer Phasen in das Fahrzeug übertragen. Das im Fahrzeug eingebaute Ladegerät übernimmt die Gleichrichtung und steuert das Laden der Batterie. In der Regel erfolgt das Aufladen kabelgebunden. Es ist aber auch kontaktloses (induktives) Laden möglich. Diese Technologie befindet sich allerdings noch in der Entwicklung und ist noch nicht kommerziell in grösserem Umfang verfügbar.

Das Laden mit **Gleichstrom** benötigt eine direkte Verbindung des Fahrzeugs mit der Ladestation über ein Ladekabel. Das Ladegerät ist in der Ladestation integriert. Die Steuerung des Ladens erfolgt über eine spezielle Kommunikationsschnittstelle zwischen Fahrzeug und Ladestation. Mit Gleichstrom lässt sich ein Akku mit einer höheren Leistung und damit schneller aufladen (Ecomento, o. D.).

Eine weitere Möglichkeit des Aufladens stellt der **Batteriewechsel** dar. Diese Art spielt jedoch bislang keine grosse Rolle und wird vor allem bei E-Bikes eingesetzt (vgl. Steckbrief Lastenräder) (Bundesverband der Energie und Wasserwirtschaft et al., 2020)

Marktreife		Verbreitungsgrad	
Erste Ideen und Visionen	Vollständige kommerzielle Implementierung	Niedrig	Hoch
			
Die Bewertung der Marktreife hängt davon ab, wie hoch die geforderte Leistung der Ladestation ist. Ladestationen mit einer Leistung bis 350kW sind marktreif, höhere Ladeleistungen befinden sich noch in der Entwicklung (Stand 2019) (Plötz, et al., 2020, S.5)		Die Anzahl an öffentlichen Ladestationen für BEV-Lkw in Deutschland liegt derzeit (Stand 2020) «bei nahe null» (Werwitzke, 2020).	
SWOT-Analyse			
Stärken • BEV-Ladestationen ermöglichen den Einsatz von BEV-Lkw, mit denen sich die CO₂-Emissionen im Strassengüterverkehr erheblich reduzieren lassen (Plötz, et al., 2020). • Für die Ladeinfrastruktur kann auf das bereits bestehende Wechselstromnetz zurückgegriffen werden (Protoscar, 2019, S.9).		Chancen • Während der gesetzlich vorgeschriebenen Fahrpausen können die Lkw (zumindest teilweise) aufgeladen werden (Plötz, et al., 2020). • Gelingt es, die benötigte Ladedauer zu reduzieren, so ist auch die Anzahl an benötigten Ladestationen geringer (Plötz, et al., 2020, S.24). • Normen bieten Investoren Sicherheit für ihre Investitionen in die Ladeinfrastruktur (Bundesverband der Energie und Wasserwirtschaft et al., 2020, S.6).	
Schwächen • Ladestationen für Lkw brauchen sehr hohe Leistungen, damit der Ladevorgang in vertretbarer Zeit durchgeführt werden kann (Plötz, et al., 2020). • Wegen der geringen Reichweite und der langen Ladezeiten ist eine grosse Anzahl an Ladestationen notwendig. • Ladestationen mit einer sehr hohen Leistung stellen hohe Anforderungen an die Umsetzung (z.B. sind Kühlaggregate notwendig) (Bundesverband der Energie und Wasserwirtschaft et al., 2020, S.12).		Risiken • Hohe Spannungen, mit denen die BEV aufgeladen werden, stellen für den Menschen eine Gefährdung dar. Es muss daher beachtet werden, dass beim «Betanken» der Zugang zu spannungsführenden Teilen erschwert wird (Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie, 2013).	



Anbieter



ABB

- ABB bietet Hochleistungsladestationen an, welche damit beworben werden, dass sie sich auch für zukünftige BEV eignen.
- Die Ladestationen können ein Fahrzeug mit einer Leistung von 150kW laden (bei einem 400V-Fahrzeug und einem Ausgang von 375A). Es wird aber auch eine Leistung von 500kW genannt.

(Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie, 2013)



Tesla

- Tesla plant Supercharger, mit denen eine Ladeleistung von bis zu 350kW möglich sein soll. Insbesondere für den Tesla Semi wird vermutet, dass die Leistung der bisherigen Supercharger nicht ausreichen

(Schaal, 2020b).

Pilotprojekte



Dauer des Projekts	Ab 2020
Projektrahmen und -partner	ASKO, ABB
Inhalt	ABB hat mit dem grössten Lebensmittelhändler Norwegens eine Vereinbarung über die Lieferung der Ladeinfrastruktur für seine wachsende Flotte an Elektrofahrzeugen geschlossen. ASKO setzt täglich etwa 600 Lastwagen ein und hat sich das Ziel gesetzt, bis 2026 eine emissionsfreie Verteilung der Lebensmittel zu erreichen. Hierfür sollen ABB-Ladestationen an den Vertriebszentren in ganz Norwegen installiert werden. Die Leistung der Ladesäulen, die bereits in Betrieb sind, liegt bei 150kW.

(Schaal, 2020a)

Betriebswirtschaftliche Kosten

Kostenaspekte

Anschaffungskosten:

- Die Kosten für eine Ladestation hängen in erster Linie davon ab, wie gross die Leistung ist. So werden etwa für eine Ladesäule mit einer Leistung von 22kW Investitionskosten von 2'600€, für eine Leistung von 44kW 15'250€ und für eine Schnellladestation (keine genaueren Angaben über die Leistung) 90'000€. Man erkennt also, dass die Kosten sehr stark mit der Leistung ansteigen (stärker als proportional) (Hacker et al., 2015, S.38)
- Ein amerikanisches Paper nennt Kosten von 800\$ bis 140'000\$. Die Kosten für verschiedene Schnelllader (Gleichstrom) sehen folgendermassen aus:

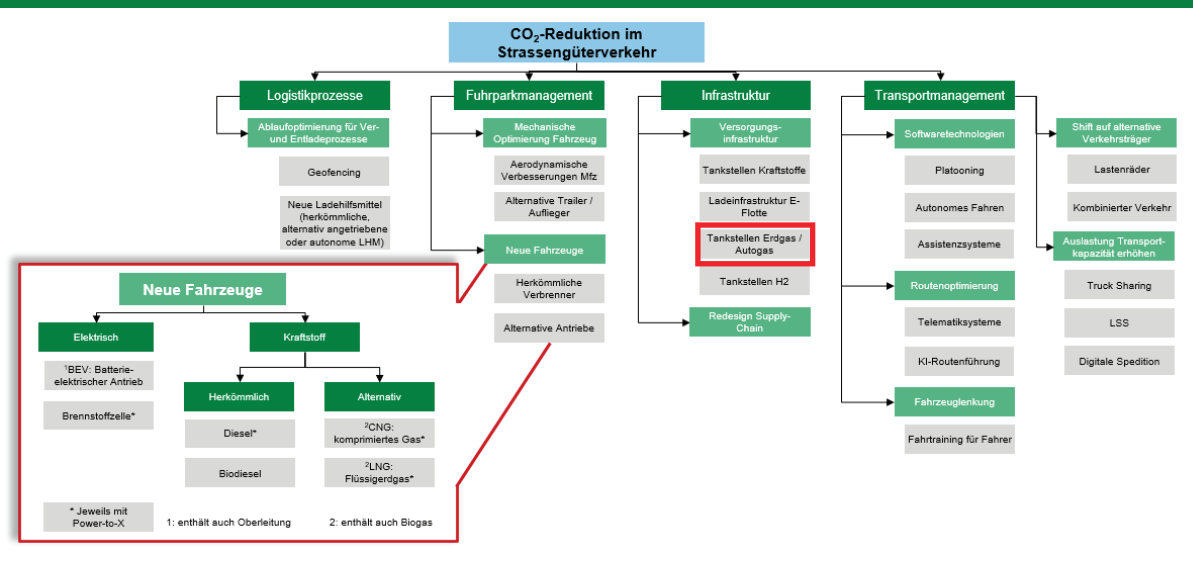
Leistungen in kW	Kosten
50	28'401\$ (Nicholas, 2019)
150	75'000\$ (Nicholas, 2019)
350	140'000\$ (Nicholas, 2019)
450	400'000€ (Kühnel et al., 2018, S.89)

Tabelle 9: Kosten für einen Schnelllader nach Kilowattleistung

- Für den Strassengüterverkehr ist es naheliegend, dass Ladegeräte mit einer hohen Leistung benötigt werden, insbesondere, wenn nicht nur über Nacht aufgeladen wird. Nimmt man z.B. einen Akku mit einer Kapazität von 500kWh, so dauert das Aufladen mit einer Gleichstromladesäule mit 50kW $\frac{500kWh}{50kW} = 10h$.

Tankstellen Erdgas

Verortung der Massnahme im Cluster



Definition

Erdgas ist ein Naturprodukt, das alle gasförmigen Kohlenwasserstoffverbindungen umfasst, die aus der Erde stammen und brennbar sind. CNG steht für Compressed Natural Gas, es handelt sich also um komprimiertes Erdgas. Die Komprimierung des Erdgases erfolgt an den Erdgas-Tankstellen (Zukunft Gas, 2017). Wird das Erdgas hingegen verflüssigt, bezeichnet man es als LNG (Liquified Natural Gas). Es hat dann eine 600-mal höhere Energiedichte als im Gaszustand (Neumann, 2016).

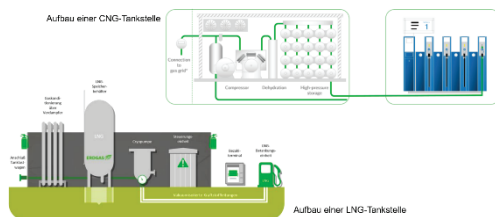


Abbildung 37: Aufbau einer CNG & LNG Tankstelle (Klukas et al., 2017)

Funktionsweise

Es lassen sich drei Klassen von CNG/LNG-Tankstelleninfrastrukturen unterscheiden: reine CNG-Tankstellen, reine LNG-Tankstellen und kombinierte L-CNG-Tankstellen.

Die Hauptkomponenten einer CNG-Tankstelle sind Verdichter, Speicher, Rohrleitung und Abgabeeinrichtung. CNG-Tankstellen beziehen das Erdgas aus dem Erdgasnetz. Das Erdgas wird mit dem Verdichter auf einen Druck von etwa 280 bar gebracht und in dem Hochdruckspeicher gelagert. Die Betankung erfolgt durch die Druckdifferenz vom Speicher zum Druckbehälter im Fahrzeug.

LNG-Tankstellen bestehen hauptsächlich aus einem kryogenen vakuumisolierten LNG-Speicherbehälter, einer Kypumpe und vakuumisolierten Kraftstoffleitungen. Die Belieferung des LNG erfolgt in der Regel per Lkw. Mithilfe von Gyropumpen wird das LNG aus dem Speicher in die Kraftstoffbehälter der Fahrzeuge befördert.

Mit L-CNG-Tankstellen lässt sich sowohl CNG als auch LNG tanken. Das durch die Erwärmung entstehende Boil-Off-Gas wird zu CNG komprimiert und in kleinen Hochdrucktanks gespeichert (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2011).

Marktreife

Erste Ideen und Visionen

Vollständige kommerzielle Implementierung

CNG und LNG als Treibstoff für den Schwerverkehr sind marktreif (Schwander, 2020).

Verbreitungsgrad

Niedrig

Hoch

Es gibt ungefähr 900 Tankstellen mit CNG-Versorgung in Deutschland (RP Digital, o. D.), die Anzahl an LNG-Tankstellen liegt bei 24 (Stand August 2020) (Energie Informationsdienst, o.D.) In der Schweiz gibt es mehr als 145 CNG-Tankstellen (energie360, o.D.) und 3 LNG-Tankstellen (Stand 2018) (Swiss Camion, 2018). In Österreich gibt es 149 CNG-Tankstellen (Fachverband Gas Wärme, o. D.) und eine LNG-Tankstelle (Stand 2019) (RAG Austria, o. D.). Der Verbreitungsgrad ist also noch relativ gering.

SWOT-Analyse

Stärken

- LNG ist eine geruchs- und farblose, nicht korrosive, nicht entflammbare und nicht toxische Flüssigkeit. In dieser Hinsicht ist LNG also zunächst weniger gefährlich als Diesel (Adolf et al., 2019).
- Mit LNG sind die Kraftstoffkosten geringer als bspw. bei Dieselfahrzeugen. Zudem bleibt dieser langfristig erhalten, da die weltweiten Produktionskapazitäten wachsen und die Nutzung von LNG immer effizienter wird (Zukunft Gas, o. D.-a).

Schwächen

- Die Tankstelleninfrastruktur für LNG ist nicht flächendeckend ausgebaut (vgl. Anzahl LNG-Tankstellen Verbreitungsgrad)
- Die Tankstelleninfrastruktur ist aufwendiger als etwa bei Diesel, weil das Erdgas stark gekühlt werden muss (LNG) bzw. unter hohem Druck gelagert wird (CNG) (Adolf et al., 2019).
- Der Tankstellenbetreiber muss Konformität und die diesbezüglichen Regularien beachten sowie weitere Sicherheitsmassnahmen treffen (Hine, 2019).
- Für die Betankung ist das Tragen von Schutzkleidung notwendig (Liqvis, o. D.)

Chancen

- Wenn Häfen in Deutschland gebaut werden, an denen sich LNG umschlagen lässt, (Zukunft Gas, o. D.-b) kann die Versorgung besser sichergestellt werden.
- Durch eine ausgebaute LNG-Infrastruktur entschlossen sich die Flottenbetreiber eher ihre Lkws auf den ING-Kraftstoff umzustellen, was ihnen sowohl aus ökonomischer als auch aus ökologischer Perspektive vorteilhaft ist (BarMalGas, o. D.).

Risiken

- Bei ungeschützter Exposition kann LNG bei Kontakt Kälteverbrennungen verursachen. Ausserdem besteht das Risiko, dass es zu einer Versprödung von nicht kältefesten Materialien kommen kann (Adolf et al., 2019).
- Die Tatsache, dass Infrastrukturbetreiber und Kunden in gegenseitiger Abhängigkeit stehen, führt dazu, dass für beide Seiten eine gewisse Unsicherheit bei der Umstellung auf die Technologie besteht, was die Etablierung der Technologie erschweren kann.



Anbieter



Shell

- Shell betreibt LNG-Tankstellen und baut das Netz an LNG-Tankstellen weiter aus.
- Im Programm von Shell steht der Ausbau des LNG-Stationsnetzes auf 35-40 Stationen.
- Durch die Benutzung von LNG anstelle von Diesel sollen die CO₂-Emissionen um 22% gesenkt werden.
- Shell bereitet ausserdem das Angebot von Biomethan an Tankstellen vor, womit die CO₂-Emissionen noch einmal deutlich herabgesetzt werden können.

(Shell Deutschland Oil, 2020)



Liqvis

- Liqvis betreibt seit 2017 LNG-Tankstellen in Deutschland. Für die nächsten Jahre wird eine Erweiterung der Infrastruktur geplant. Dabei wird vor allem auf Partnerschaften mit Speditionen gesetzt.
- Die neueste LNG-Tankstelle (Stand April 2020) an der A7 wurde in nur 4 Monaten erbaut (Uniper, 2020). Liqvis verfügt über vier LNG-Tankstellen in Deutschland (Stand September 2020)

(Liqvis, o. D.)



Liquind

- Das im Jahr 2015 in Berlin gegründete Unternehmen entwickelt ein deutschlandweites, flächendeckendes Netzwerk von LNG-Tankstellen. Der Fokus liegt dabei auf der Versorgung kontinentaler Binnenmärkte.
- Das Ziel des Unternehmens ist es, LNG in Deutschland als Substitutionsstoff für Diesel verfügbar zu machen und damit den Transportsektor zu vergrünen.

(Liquind, o. D.).



Pilotprojekte

Name des Projekts	Goodbye Diesel – Hello LNG
Dauer des Projekts	2019
Projektrahmen und -partner	Krummen Kerzers, Lidl Schweiz
Inhalt	Das Projekt umfasst den Aufbau einer Tankstelleninfrastruktur entlang der Ost/West-Hauptverkehrsachse der Schweiz. Zunächst werden drei LNG-Tankstellen gebaut. LNG wird verwendet, weil es sich um eine Antriebstechnologie handelt, die technisch ausgereift ist und somit schon jetzt gehandelt werden kann. Ausserdem haben Erfahrungen gezeigt, dass trotz höherer Anschaffungskosten bei entsprechenden Kilometerleistungen der LNG-Lastwagen auch ökonomisch sinnvoll ist. Mittelfristig ist der Übergang von LNG zu verflüssigtem Biogas (LBG) geplant, womit die CO ₂ -Emissionen (Well-to-Wheel) um 80% reduziert werden können

(Energie, Wasser-Praxis, 2018; Logistik Online, 2019)

Betriebswirtschaftliche Kosten

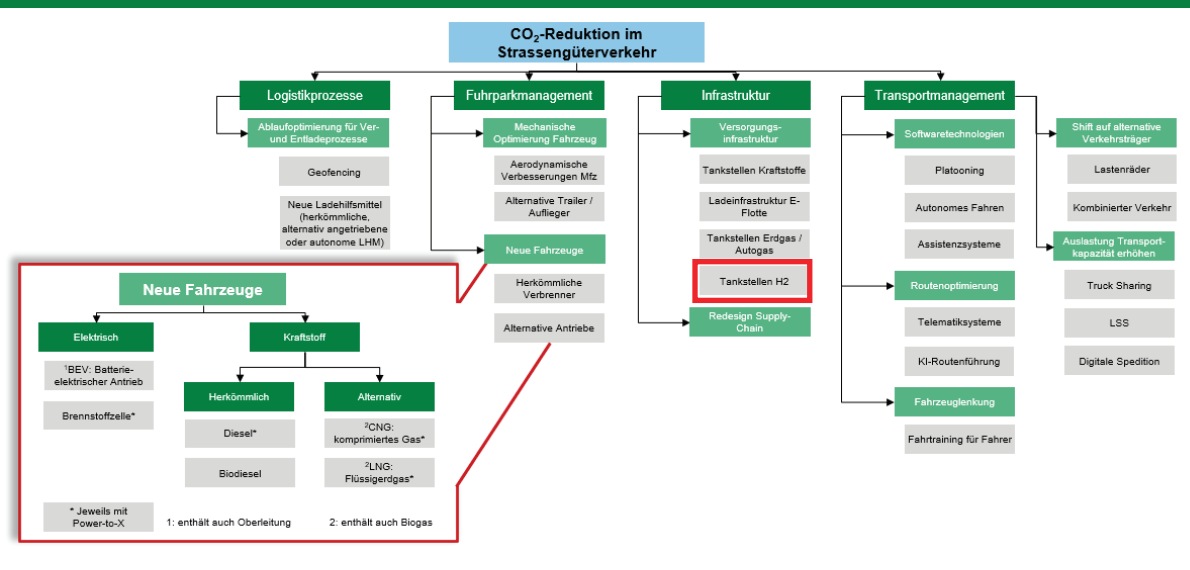
Kostenaspekte

Anschaffungskosten:

- Die Schaffung einer Infrastruktur für LNG in Deutschland, die 13 Tankstellen umfasst, erfordert Investitionen in Höhe von 15 Mio. € (Klukas et al., 2017)
- Eine CNG-Tankstelle, an der auch Lkw tanken können, kostet zwischen 517000€ und 775000€. (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2011, S.207)
- Die Errichtung einer LNG-Tankstelle kostet 1,5 Mio. €, der Betriebskosten (Abschreibungen, Personalkosten, Wartungskosten, Instandhaltungskosten) liegen bei 166400€ (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2011, S.211)
- Die Investitionskosten pro LNG-Tankstelle liegen bei 1,2-1,5 Mio. € (Albus et al., 2016, S.41)

Tankstellen H2

Verortung der Massnahme im Cluster



Definition

Für eine Realisierung und nachhaltige Implementierung von H₂-Lkw in den Strassengüterverkehr bedarf es einer entsprechenden Versorgungs-Infrastruktur. Diese muss die Versorgung von Brennstoffzellenfahrzeugen mit Wasserstoff möglichst flächendeckend übernehmen. Für eine funktionierende Infrastruktur umfasst eine ausreichende Produktion, einen zuverlässigen Transport sowie zusätzliche Standortlösungen, welche die Anlieferung, Speicherung und Betankung von Nutzfahrzeugen ermöglichen. Eine Wasserstofftankstelle kann in eine bestehende Tankstelle integriert, als «Stand-alone» Lösung neu errichtet oder als Mobile Tankstelle in einem transportablen Container für eine H₂-Versorgung im Rahmen eines befristeten Demonstrationsprojekts aufgestellt werden (Shell Deutschland Oil, o. D.).

Funktionsweise

Der Transport von H₂ erfolgt entweder gasförmig oder mit Hilfe eines flüssigen organischen Wasserstoffträgers (*eng.: liquid organic hydrogen carriers, LOHC*). Dieser kann Wasserstoff durch chemische Reaktion aufnehmen und wieder abgeben und wird als Speichermedium verwendet.

Der Prozess der Bereitstellung von H₂ in flüssiger Form läuft wie folgt ab: Ein Elektrolyseur wird von Photovoltaik- oder Windstrom gespeist und stellt regenerativen Wasserstoff bereit. In einer stationären Hydriereinheit wird der Wasserstoff anschließend chemisch an den LOHC gebunden. Der wasserstoff-reiche LOHC+ wird dann in einer Tankstelle gelagert und bei Bedarf von den Fahrzeugen getankt. Im Fahrzeug selbst erfolgt die Wasserstofffreisetzung unter Bildung des wasserstoff-armen LOHC-. Dieses wird bei der nächsten Betankung an der Tankstelle abgegeben (Arlt & Obermeier, 2017).

Es werden zwei Szenarien einer LOHC-Infrastruktur unterschieden. Differenziert wird hierbei nach dem Ort, an dem der Wasserstoff erzeugt wird. Bei einer zentralen Wasserstoffbereitstellung befindet sich der Elektrolyseur und die Hydriereinheit in der Nähe der Energieerzeugung, wie eines Wind- bzw. Solarparks. Die Verteilung des LOHC+ erfolgt anschließend straßengebunden mit Tanklastwagen. Eine Alternative dazu ist die dezentrale Wasserstoffherzeugung. Dabei wird der Elektrolyseur direkt an der Tankstelle betrieben. Zu diesem Zweck muss die Tankstelle über eine Hochspannungsleitung mit dem Elektrizitätsnetz verbunden sein (Arlt & Obermeier, 2017).

Der Tankvorgang erfordert ungefähr gleich viel Zeit wie das Tanken von Benzin oder Diesel.

Darstellung von Tankstellenkonzepten für schwere Nutzfahrzeuge und von H₂-Infrastrukturszenarien

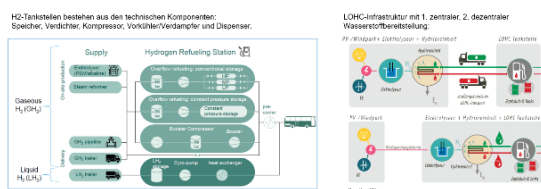


Abbildung 38: Tankstellenkonzepte für H₂-Infrastrukturszenarien (Ehret, 2020; Arlt & Obermeier, 2017)

Marktreife		Verbreitungsgrad	
Erste Ideen und Visionen	Vollständige kommerzielle Implementierung	Niedrig	Hoch
Der Technology Readiness Level / Technologie-Reifegrad (TRL) ist eine Skala von 1-9, welche auf der Basis einer systematischen Analyse entsteht, ordnet global gesehen Brennstoffzellen-Lkw dem TRL 7 bis 8 zu (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, 2020). Die Unterstützung eines Tankstellenaufbaus sowie einheitliche und schnelle Genehmigungsverfahren für Tankstellen sind bereits angestoßen und sind bis zum Ziel 1000 Kfz-Tankstellen in Deutschland 2030 mit öffentlicher Förderung fortzuführen. Des Weiteren muss die Infrastruktur für Lkw realisiert werden (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, 2020). Zusätzlich zum Aufbau eines Pkw-Tankstellennetzes über die H2Mobility bis 2030 muss in den Jahren 2025 bis 2030 ein Schwerlast-Tankstellennetz errichtet werden. Spätestens ab 2025 sollte die Kommerzialisierung von Brennstoffzellen-Lkw starten (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, 2020).		Mitte Januar 2020 sind in Deutschland 81 Tankstellen (davon 7 Tankstellen für Lkw) für Brennstoffzellen Pkw in Betrieb und 24 Anlagen in der Realisierung. Bis 2021 soll das Tankstellennetz auf 140 und bis 2023 auf 400 Tankstellen erweitert werden. Im April 2019 waren EU-weit 173 Pkw Tankstellen einsatzbereit und 50 in Realisierung (Ehret, 2020). Im Vergleich zu den 14'000 konventionellen Tankstellen ist die flächendeckende Versorgung noch gering. Tankstellen, welche in größerem Maße Brennstoffzellen-Lkw bedienen könnten, sind in Deutschland keine installiert (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, 2020). Die Wasserstoff-Nachfrage für den Lkw-Verkehr 2030 und 2050 in Deutschland nach eigenen Abschätzungen und Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (2020): - Wasserstoff-Bedarf 2030: 0 – 2 TWh (Ø 1 TWh) - Wasserstoff-Bedarf 2050: 130 – 160 TWh (Ø 140 TWh)	
SWOT-Analyse			
Stärken Eine bedingungslose Lagerung von LOHC+ und LOHC in konventionellen Stahltanks ist möglich. Weder an die Geometrie noch an die Art des Stahls werden Anforderungen gestellt (Arlt & Obermeier, 2017).		Chancen - Der bislang übliche Druckstandard für schwere Brennstoffzellen-Nutzfahrzeuge ist 350 bar, jedoch tendiert der Trend zur 700 bar-Versorgung. Infolge von Synergien mit dem Pkw-Tankstellennetz könnte dadurch der Infrastrukturbau wesentlich befördert werden (Ehret, 2020). - Wichtige Elemente einer Infrastrukturstrategie sind die räumliche Netzplanung, die Auswahl optimaler Tankstellenkonzepte und dessen Größe und die Abstimmung von Infrastruktur und Fahrzeugflotte. Dadurch können Investitionskosten in hohem Masse reduziert werden (Shell Deutschland Oil, o. D.).	
Schwächen - Tankstellen sind heute ein wichtiges, aber fehlendes Glied in der Versorgungskette, um die Wasserstoffmobilität flächendeckend einzuführen (Förderverein H2 Mobilität Schweiz, o. D.). - Die benötigte Wasserstoffmenge an den Lkw-Tankstellen liegen weit über denen von Pkw (eine Sattelzugmaschine weist den 60-fachen Energiebedarf im Vergleich zum Pkw auf). Es sind eigene Konzepte für die Versorgung und den Aufbau von Tankstellen mit der hohen Wasserstoff-Nachfrage notwendig (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, 2020).		Risiken Die Prüfung und gegebenenfalls die Anpassung der Regelungen bei der Fernleistungsnetz und der Gasspeicherung (Energiewirtschaftsgesetz), um eine Umstellung der vorhandenen Infrastruktur von Erdgas auf Wasserstoff zu ermöglichen, wird noch geprüft (Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie, o. D.).	



Anbieter



Wasserstofftankstelle von Rosato

Resato ist ein niederländischer Anbieter von intelligenten Hochdrucklösungen. Seit 2017 entwickeln sie Wasserstofftankstellen. Die H2Refuel Public Station wurde als öffentliche Fast Fill Hydrogen Refuel Station (HRS) für den sich entwickelnden Wasserstoff-Mobilitätsmarkt konzipiert. Es besteht eine flexible Wasserstoffversorgung über ein Flaschenregalsystem, Tanklaster, Elektrolyseur oder eine Pipeline. Die Betankung erfolgt mit 700 bar (optional 300 / 1000 bar) und der Versorgungsdruck liegt zwischen 10 und 300 bar. Sie hat eine Durchflusskapazität von >20 kg/Stunde 480 kg/Tag. Ausserdem ermöglicht eine integrierte Pufferkapazität das Betanken von drei Fahrzeugen hintereinander. Die Betankung von LKWs (HDV), Flurförderzeugen, Schiffen und Bussen ist möglich. (Resato International, o. D.)



Wasserstofftankstellen in der Schweiz

Die erste öffentlich zugängliche Wasserstofftankstelle der Schweiz ermöglicht heute das Tanken von Personenwagen (mit 700 bar) und Nutzfahrzeugen oder Bussen (mit 350 bar). Bestehende Tankstellen der Schweiz liegen in Hunzenschwil, St. Gallen und Zofingen. Geplante Tankstellen liegen in Bern, Rothenburg, Crissier, Rümlang und Geunsee. (Förderverein H2 Mobilität Schweiz, o. D.)

Pilotprojekte



Name des Projekts	LOHC Hydriereinheit
Dauer des Projekts	
Projektvolumen	
Projektrahmen und -partner	Hydrogenious Technologies mit MAN Diesel & Turbo
Datenbasis	
Ergebnisse	Die erste LOHC Hydrieranlage im kommerziellen Maßstab mit 30 kW Leistung wurde von Hydrogenious Technologies in Betrieb genommen und ist an eine 98 kWp Photovoltaikanlage und eine 50 kW PEM Elektrolyse (Siemens SILYZER) gekoppelt. Die LOHC Hydrieranlage wurde in einem 20-Fuß Seecontainer aufgebaut und ist seit Mai 2015 in dauerhaftem Betrieb mit täglichen Lastzyklen. Basierend auf dem Systemdesign der ersten Labor- und Pilotanlagen kommerzialisiert Hydrogenious Technologies LOHC Wasserstoff-Speicheranlagen in Leistungsgrößen zwischen 30 und 300 kW und entwickelt in Partnerschaft mit MAN Diesel&Turbo LOHC Hydriersysteme im Multi-Megawatt Maßstab.

(Arlt & Obermeier, 2017)



Betriebswirtschaftliche Kosten

Kostenaspekte

Anschaffungskosten:

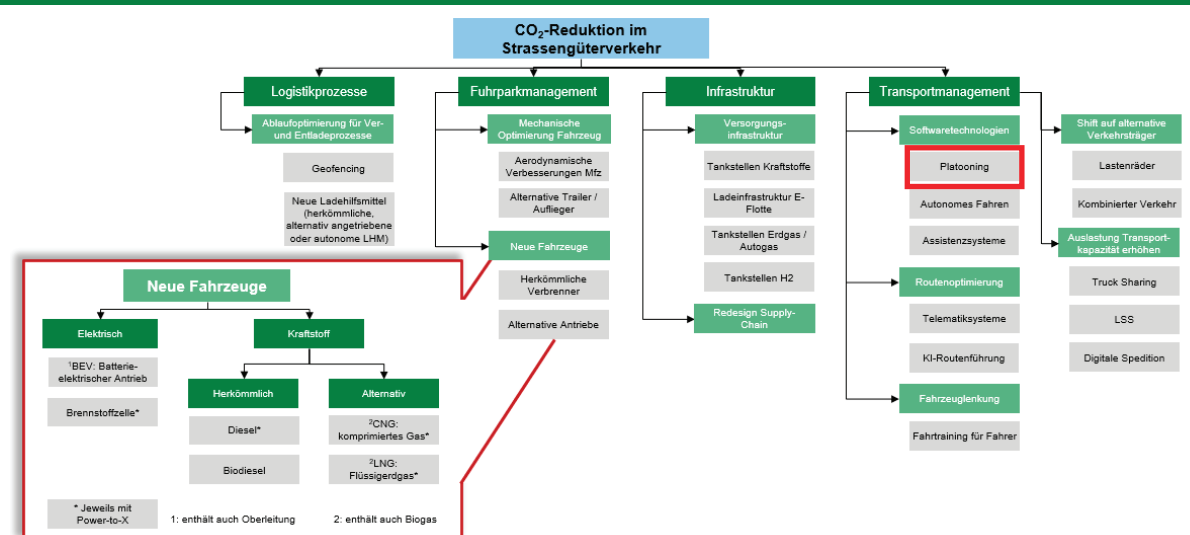
- Die Investitionskosten weisen eine grosse Spannweite auf. Diese hängt von der Grösse und damit der Tageskapazität der Tankstelle ab. Ausserdem ist die Wahl der Lage der Elektrolyse- und Hydriereinheit entscheidend.
- Eine Tankstelle für 50 schwerer Brennstoffzellen-Fahrzeuge (Lkw, Busse) liegen bei etwa 5 Mio. Euro, wird der H2 per Wasserstoffelektrolyse produziert, steigen sie auf etwa 12 Mio. Euro (Ehret, 2020).
- Es steht fest, dass mit zunehmender Grösse einzelner Tankstellen deutliche Kostenreduzierungen je abgegebener Menge H2 eintreten. In wissenschaftlichen Quellen werden Skalierungen genannt. Dort stehen tägliche Durchsätze von 212 kg und Kosten von bis zu 1,5 Mio. Euro bei einer kleinen Pkw-Tankstelle, H2-Umsätzen von täglichen 1'300 kg und Investitionskosten von 5 Mio. Euro bei Anlagen zur Versorgung von Bussen gegenüber. Zusätzlich geht die höhere Fahrleistung der Nutzfahrzeuge mit einem H2-Verbrauch von 8,5 bis 10,5 kg H2 pro 100 km einher. (Ehret, 2020; Shell Deutschland Oil, o. D.)
- Durch regulatorische und technische Standardisierung und Skaleneffekte werden substanzielle Kostenreduktionspotenziale für Wasserstofftankstellen in Höhe von rund 50 % zwischen 2017 und 2025 erwartet (CEC/CARB 2017; Shell Deutschland Oil, o. D.).
- Das Forschungszentrum Jülich beziffert die kumulierten Kosten einer H2-Infrastruktur zur Versorgung von 20 Millionen Brennstoffzellenfahrzeugen auf 40 Milliarden Euro (Ehret, 2020).
- Als betriebswirtschaftliche Metrik haben sich die Kapitalkosten bezogen auf die tägliche Abgabekapazität herausgestellt. Für kleine H2-Tankanlagen muss zwar absolut weniger investiert werden, die Kapitalspezifischen Kosten reichen jedoch von fast 15'000 USD pro kg und Tag für kleine Tankstellen bis ca. 3'000 USD/Tag für Grosse mit LH2 versorgte Stationen. Allerdings können diese geringen Kapitalkosten nur bei hoher Auslastung erreicht werden. Deutlich teurer als zentral belieferte Tankstellen sind solche mit H2-On-Site-Elektrolyse. Diese sind mit 20'000 USD/Tag zu kalkulieren, was auf die hohen Kosten des Elektrolyseurs zurückzuführen ist (Shell Deutschland Oil, o. D.).

11.3.4 Transportmanagement

11.3.4.1 Softwaretechnologien

Platooning

Verortung der Massnahme im Cluster



Definition

Beim Platooning fahren mehrere Lastkraftwagen, die auf der gleichen Strecke unterwegs sind, automatisiert hinter einem Führungsfahrzeug in Kolonne. Die hinteren Lkw fahren beim Platooning im Windschatten, dadurch wird eine Kraftstoffeinsparung und so eine Verringerung der Umweltbelastung angenommen. Ausserdem erhoffen sich Hersteller eine Verbesserung des Verkehrsflusses und eine höhere Sicherheit zu erzielen. Langfristig soll die Reduzierung der Fahrerstunden zur laufenden Umgestaltung des Verkehrssektors beitragen.

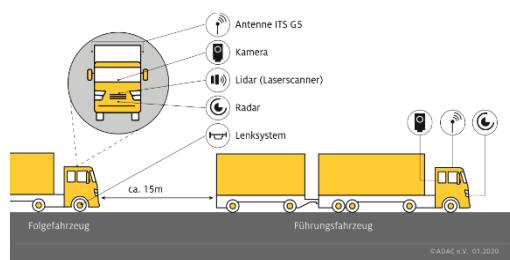


Abbildung 39: Darstellung der Platooning Technik (Tsukuba, et al., 2016)

Funktionsweise

Die Platooning fähigen Lkw sind über Car-to-Car-Kommunikation zu einer Einheit vernetzt. Technisch ausgerüstet sich diese Lkw mit zwei Kameras, Laser, GPS und Radar. (ADAC, 2020) Die Sensortechnologien für die automatisierte Fahrzeugsteuerung sind Computer Vision, Radar, Lidar, Laserscanner, Lokalisierung durch GNSS und Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation (Muratori et al., 2017).

Die Fahrzeuge im Platoon (engl. «Trupp, Einheit») tauschen über WLAN (ITS G5) ständig Daten über den Zustand des Platoons, die Geschwindigkeit, die Beschleunigung, die Bremsverzögerung und die GPS-Position aus. Der Fahrer des ersten Lkw gibt Tempo und Richtung vor. Alle anderen Fahrzeuge folgen dem Führungsfahrzeug automatisiert und lenken sowie bremsen selbsttätig im Takt des Führungsfahrzeugs. Die hinteren Fahrzeuge reagieren ohne Zeitverzögerung und würden auch bei einer Notbremsung des ersten Lkw nicht auffahren. Bei widrigen Bedingungen wie in Baustellen, bei regnerischem Wetter oder bei Autobahnkreuzungen wird das Platooning-System ausgeschaltet und die Fahrzeuge werden wieder manuell gesteuert (ADAC, 2019).

Der Abstand zwischen den Lkw liegt zwischen 15 und 21 Metern. Dies ist ein deutlich geringerer Fahrzeugabstand als beim Fahren ohne Platooning (ADAC, 2019). Gesetzlicher Mindestabstand von 50 Metern ab einer Geschwindigkeit von 50 km/h (StVO 2020).

Marktreife		Verbreitungsgrad	
Erste Ideen und Visionen	Vollständige kommerzielle Implementierung	Niedrig	Hoch
Langzeitstudien zeigen eine extrem hohe Zuverlässigkeit des verbauten Platooning-Systems von 98 Prozent. Die Fahrer der Lkw mussten laut MAN und DB Schenker nur einmal alle 2'000 Kilometer eingreifen. Bei einer Fahrleistung von 35'000 Kilometern ist dies deutlich seltener als erwartet (ADAC, 2019). Entscheidend für den Durchbruch von Platooning ist es, dass sich die Hersteller auf ein System einigen müssen, damit Lkw verschiedener Marken zusammenfinden können. Dazu wurde die EU-Initiative „Ensemble“ gegründet, in der sich Hersteller von DAF bis Volvo, sowie Zulieferer von Bosch bis ZF (20 Partnern aus ganz Europa mit 20 Millionen Euro Fördergeldern) wiederfinden (Becker, 2019). In nur drei Jahren soll ein Testlauf auf europäischen Straßen realisiert werden (Gillies, 2019).		Platooning ist heute im Realverkehr in Deutschland nicht erlaubt (Gillies, 2019). Hürde für Lkw-Platooning könnte auf der Seite der Anwender, den Fuhrparkunternehmen liegen. Die Anwender müssten umdenken, da sich die Fahrzeuge verschiedener Speditionen und Logistikkonzerne schnell und unkompliziert zu Verbänden zusammenschließen müssen (Gillies, 2019).	
SWOT-Analyse			
Stärken		Chancen	
- Der Vorteil der Platooning-Technologie liegt zum einen im Windschatteneffekt, der die Folgefahrzeuge effizienter fahren lässt. Zum anderen reagieren die elektronisch gekoppelten Fahrzeuge wie eine Einheit, was die Sicherheit erhöht, Emissionen und Kosten spart und die Fahrer entlastet (Emobilitaet.online, 2019). - Das Platooning ist als Vorstufe für vernetzte und automatisierte Fahrzeuge (CAVs) zu sehen, welches ohne radikale Konstruktions- oder Technologieänderungen auskommt. - Praxisprojekte und -studien laufen, um die tatsächliche Kraftstoffeinsparung zu prüfen. Bei Schenker, Continental und MAN will man die Auswertung der Daten abwarten, klingt aber positiv eine Einsparung im zweistelligen Prozentbereich zu erreichen		- Das Logistikunternehmen DB Schenker ist überzeugt davon, dass mit Platooning etwa 40 Prozent der in Europa gefahrenen Transportkilometer abgedeckt werden könnten. Voraussetzung dafür: Weitere Tests, bei denen es um die Lenkzeiten und die exakten Abstände zwischen den Lkw geht (ADAC, 2019). - Attraktiv für Spediteure sind die autonomen Systeme zunächst bei Touren von weniger als 200 Kilometern, da auf Strecken wie beispielsweise zwischen Häfen und Verteilzentren, die meisten Lkw unterwegs sind (Becker, 2019). - Den Ausstieg Daimlers Anfang 2019 aus der Platooning-Entwicklung haben andere Nutzfahrzeughersteller relativ gelassen hingenommen, da Daimler weiterhin in Gremien wie «Ensemble» ihren versprochenen Beitrag leisten und in die Technologie des automatisierten Lkw-Fahrens investieren (Gillies, 2019). - Fahrer können anderen Tätigkeiten nachgehen (Bundesamt für Strassen, 2017)	
Schwächen		Risiken	
- Erwartet wurden über Jahrzehnte der Forschung 10% Einsparungspotential im Kraftstoffverbrauch. Daimler veröffentlichte Anfang 2019, dass «in USA-Pilotprojekten erhoffte Werte unterschritten wurden» (Emobilitaet.online, 2019). Die erwarteten Werte konnten in Pilotprojekten daher bisher nicht bestätigt werden (ADAC, 2019). - Bis zur Bildung des Platoons können im Einzelfall Wartezeiten entstehen. - Bei jeder Auf- und Abfahrt muss der Konvoi entkoppelt werden, um andere Fahrzeuge einfädeln zu lassen. Der Folge-Lkw muss daraufhin wieder beschleunigen, um erneut		- Daimler als europäischer Lkw-Marktführer gibt Anfang 2019 Platooning auf (Gillies, 2019). Daimler kündigt an, sich über aktuell laufende Projekte hinaus nicht weiter mit dem Thema Platooning zu beschäftigen (Emobilitaet.online, 2019). Sie wollen halbautomatisierte Systeme überspringen, stattdessen eine halbe Milliarde Euro investieren, um innerhalb von zehn Jahren vollautonome Roboter-Lkw zu bauen (Fuchs, 2019). - Der Gesetzgeber ist ein weiterer Bremsfaktor: MAN und Schenker brauchten eine Ausnahmegenehmigung, um die vorgeschriebenen 50 Meter Abstand zu unterschreiten und die Trucks testweise in 15-Meter-Abstand fahren lassen zu	



Anschluss an den vorfahrenden Lkw zu finden, was einen Großteil der Effizienzgewinne zunichtemacht (Gillies, 2019).

können.

- Die Haftungsfragen sind noch ungeklärt.

Anbieter



Knorr-Bremse & Continental (2019)

- Der Anbieter von Brems- und Schubsystemen Knorr-Bremse AG und das Technologieunternehmen Continental haben gemeinsam einen Platoon-Demonstrator entwickelt. Dieser Demonstrator ermöglicht das Fahren in der Kolonne von drei Lkw verschiedener Hersteller.
- Fahrfunktionen, die die beiden Hersteller gemeinsam entwickelt haben, sind das Bilden des Platoons, das gemeinsame Fahren, die Notbremsfunktion, das Verlassen des Platoons einzelner Fahrzeuge, sowie das sichere Entkoppeln der gesamten Kolonne
- Continental ist für die Sensorik verantwortlich. Verbaut wurden moderne Sensortechnologien wie Kameras, Radar- und LiDAR-Sensoren
- Knorr-Bremse bringt mit der Spurführung (Trajektorie) Expertise hinsichtlich der Anforderungen an die Nutzfahrzeugdynamik ein. Darüber hinaus setzt Knorr-Bremse die Anforderungen an die Fahrstabilität („Motion Control“) und übernimmt die Systemintegration



MAN

- Ein Platooning-fähiges Fahrzeug ist der MAN aus dem Pilotprojekt «EDDI».
- In Serienproduktion kommen bei MAN der abstandsgeregelte Tempomat ACC und das Notbremssystem EBA vor. Über den Türen am Fahrerhaus befinden sich die Antennen für die Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation. Zur Anwendung kommt ein von MAN selbst entwickeltes Protokoll, basierend auf WLAN11p (ITS G5). Zusätzlich zum serienmäßig vorhandenen Radar- und Kamerasensor hat MAN in den Platooning-Fahrzeugen einen Lidar-Sensor (Light Detection and Range) verbaut. Die Abstandsregelung übernehmen Serienradar und Serienkamera. Auch Serien-Bremssystem und -Notbremsassistent wurden für die Nutzung während einer Platoonfahrt angepasst. Ein Sicherheitssteuergerät interagiert mit allen beteiligten Komponenten und verwaltet die Beschleunigungs- und Verzögerungsanforderungen. (Lammert et al., 2020)



Ortec

Für ein schnelles und unkompliziertes zusammenschließen zu Platooning-Verbänden braucht es eine Plattform. Die niederländische IT-Firma Ortec hat ein Programm entwickelt, das diese automatische Partnerzuteilung der Lkw übernimmt. Die digitale Drehscheibe würde zugleich dafür sorgen, dass die Einsparungen gleichmäßig über Ausgleichszahlungen verteilt werden. (Gillies, 2019)

Pilotprojekte



SCHENKER



SCANIA



Name des Projekts	«Sweden for Platooning» S4P
Dauer des Projekts	2017 - 2019
Projektvolumen	k.A.
Projektrahmen und -partner	RISE Research Institutes of Sweden, Volvo, Scania, DB-Schenker, Swedish Transport Administration/Movea, KTH Royal Institute of Technology
Testfeld	k.A.
Datenbasis	Auswertung der Daten von quantitativen Testkilometern
Ergebnisse	Es gibt ein erhebliches Potenzial für die Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und damit des CO₂-Ausstoßes durch Platooning-Fahrten Das Warten in der Größenordnung von Minuten auf eine Platooninggelegenheit ist rentabel, es ist jedoch nicht sinnvoll eine andere Route zu wählen Volvo und Scania sind in der Lage, gemeinsam Platooning zu nutzen, Es ist notwendig über einen eigenen Softwaredienst zu verfügen, welches die Bildung und Aufteilung der Fahrzeugkolonne ermöglicht und die mit der Platooning-Fahrt erzielten Kostenvorteile verrechnet Es gibt verschiedene Möglichkeiten, ein solches Fahrdienstsystem zur Aufteilung der Ausgleichszahlungen zu implementieren.

(Axelsson et al., 2020)



SCHENKER

Name des Projekts	«Elektronische Deichsel - Digitale Innovation» EDDI
Dauer des Projekts	2017 - 2019
Projektvolumen	3,40 Millionen Euro
Projektrahmen und -partner	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, MAN Truck & Bus, DB Schenker und der Hochschule Fresenius
Testfeld	Digitales Testfeld Autobahn A9 zwischen München und Nürnberg
Datenbasis	Auswertung der Daten von 35'000 Testkilometern
Ergebnisse	Die Verfügbarkeit des Systems lag bei 98 Prozent. Nur rund 0,5 Mal pro 1'000 Kilometer musste es vom Fahrer manuell gesteuert werden Der Pilotbetrieb hat gezeigt, dass sich im Folgefahrzeug des Platoons eine Kraftstoffersparnis von drei bis vier Prozent gegenüber dem Referenzwert eines vollständig identischen MAN TGX-Fahrzeuges realisieren lässt Im Führungsfahrzeug liegt die Kraftstoffersparnis bei rund 1,3 Prozent Die Messungen der Hirnströme mittels EEG ergaben keine Unterschiede zwischen den Fahrern eines normalen oder eines Platoon-Lkw, so die Hochschule Fresenius. Das Vertrauen in die Technik im Lauf der Projektphase konnte gesteigert werden.

(Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, o. D.)



Name des Projekts	«Hamburg TruckPilot»
Dauer des Projekts	2018 - 2021
Projektvolumen	k.A.
Projektrahmen und -partner	Hamburger Hafen und Logistik AG (HHLA), MAN Truck & Bus
Testfeld	Eine 70 Kilometer lange Autobahnstrecke auf der A7 ab der Anschlussstelle Soltau-Ost
Datenbasis	k.A.
Ergebnisse	Die Projektpartnerschaft wurde im Rahmen des 28. Weltkongresses für Intelligente Verkehrs- und Transportsysteme (ITS) 2021 in Hamburg gebildet Es sind zwei fahrerlose Prototypen-Trucks, die das Container Terminal Altenwerder (CTA) anfahren geplant Ziel ist in den kommenden Jahren das Testen automatisierter beziehungsweise autonom fahrender Lkw im Realeinsatz und damit die Entwicklung von Automatisierungslösungen für den Straßenverkehr. Es werden Erkenntnisse für die Weiterentwicklung der Technik hin zu einem kundenreifen System generiert Der Fahrer könnte so die gesetzlichen Rahmenbedingungen einhalten während der automatisierten Autobahnfahrt zum Beispiel Frachtpapiere bearbeiten oder sich ausruhen.

(Becker, 2019; Hafenzeitung, 2020)

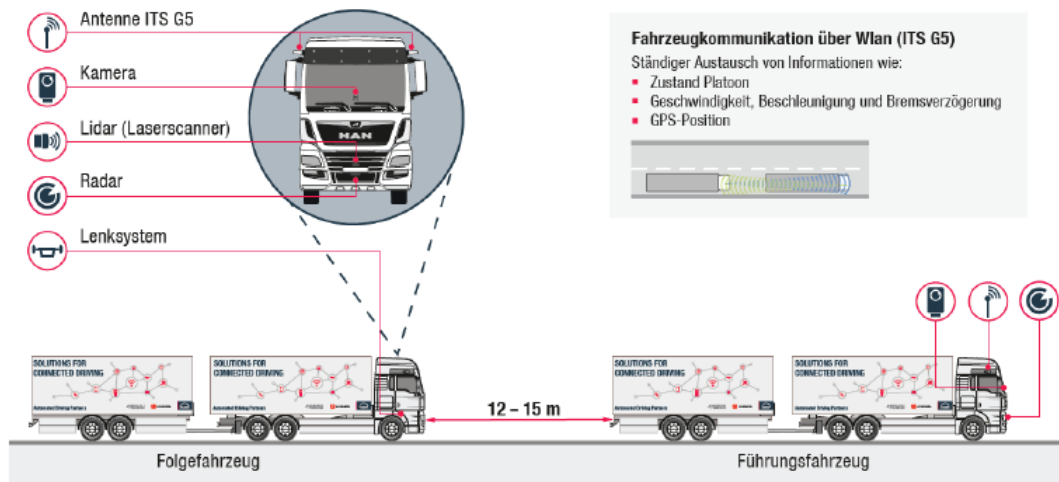


Abbildung 40: Pilotfahrzeuge von MAN im Praxistest (Reus, 2018)

Betriebswirtschaftlicher Mehrwert

Kostenaspekte

- Anschaffungskosten bei Neukonfiguration/ Nachrüstkosten
- Betriebskosten/-einnahmen
- Break-even Point (Gewinnschwelle)

Beispielrechnung der Kosteneinsparung durch Platooning

$$\text{Break-Even-Point: } 23'000 \text{ Euro} = \frac{1,20 \text{ Euro}}{\text{Liter}} * \frac{30 \text{ Liter}}{100 \text{ km}} * 100'000 \text{ km} * 8\% * x$$

Der Break-Even-Point ist bei $x = \text{in Jahre}$ erreicht

Berechnung des «Break-even Points»

- Anschaffungskosten der Platooningtechnik pro Lkw: rund 23'000 Euro
- Laufzeit 100'000km pro Jahr
- 30 l/100km
- 8% (bzw. 4%, 3%) Kraftstoffeinsparung durch Platooning
- Kraftstoffpreis in DE (1,20Euro/ Liter)



- Durch Platooning wird 2'880 Euro pro Jahr (bzw. 1'440, bzw. 1'080) weniger für Diesel ausgegeben
- Die Mehrausgaben für die Technik wären nach 8 (bzw. 16, bzw. 21) Jahren wieder eingespielt. (Gillies, 2019; Muratori et al., 2017)

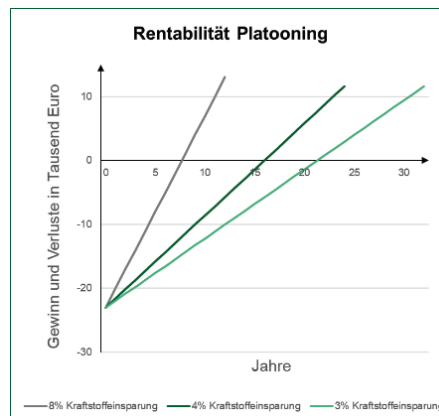
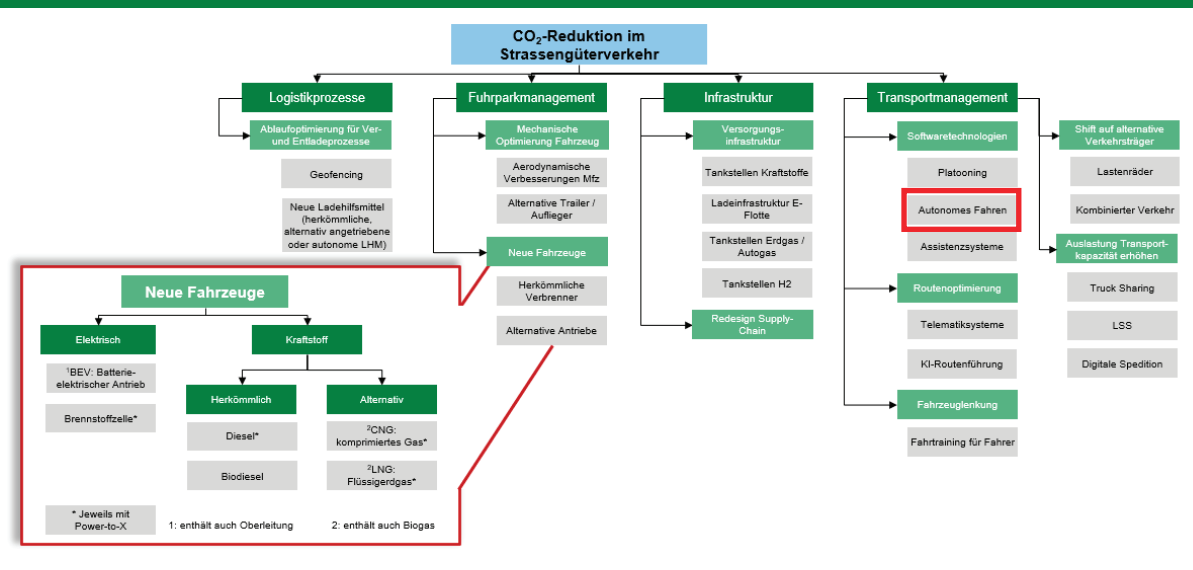


Abbildung 41: Rentabilität Platooning (eigene Darstellung)



Autonomes Fahren

Verortung der Massnahme im Cluster



Definition

Autonomes Fahren bezeichnet das vollständig automatisierte Fahren eines Fahrzeugs ohne Eingriff des Fahrers. Der Weg dorthin wird als automatisiertes Fahren beschrieben. Es werden verschiedene Stufen des automatisierten Fahrens unterschieden:

- Stufe 0: keine Automation
- Stufe 1: das Auto verfügt über einzelne unterstützende Systeme wie Antiblockiersystem
- Stufe 2: automatisierte Systeme übernehmen Teilaufgaben (z.B. adaptive Geschwindigkeitsregelung). Die Stufe 2 des autonomen Fahrens ist bereits auf dem Markt verfügbar (zumindest für Pkw) (BMW, 2020) (vergleiche Steckbrief Fahrerassistenzsysteme)
- Stufe 3: Das Auto kann streckenweise selbsttätig beschleunigen, bremsen und lenken. Bei Bedarf fordert das System den Fahrer auf, die Kontrolle zu übernehmen. Bis Stufe 3 hat der Gesetzgeber in Deutschland einen rechtlichen Rahmen erstellt (TÜV Nord, 2019). Platooning ist der Stufe 3 des autonomen Fahrens zuzuordnen (Geiger, 2018)
- Stufe 4: Das Fahrzeug kann vollständig autonom fahren. Der Fahrer hat aber die Möglichkeit, selbst einzugreifen
- Stufe 5: Vollständiger automatisierter Betrieb des Fahrzeugs ohne die Möglichkeit (und Notwendigkeit) des Fahrers, einzugreifen (Gelowicz & Scheffels, 2018; ADAC, 2020)

Funktionsweise

Wichtig für das Autonome Fahren ist die Fähigkeit des Fahrzeugs, seine Umwelt wahrzunehmen. Dafür ist das Fahrzeug mit mehreren Messeinrichtungen versehen: Videokameras sind an allen Seiten des Fahrzeugs angebracht. Diese können Objekte, Fussgänger und Radfahrer erkennen und die Entfernung des eigenen Fahrzeugs zu ihnen messen. Neben den Kameras ist das Fahrzeug ausserdem mit Radarsensoren ausgerüstet, die den Abstand zu anderen Verkehrsteilnehmern messen. Mit dem GPS-System wird ein Blick über die nähere Umgebung hinausgegeben.

Die mit der Sensorik erfassten Daten werden von einem Computer ausgewertet und kategorisiert: Es werden Fahrbahn, Verkehrszeichen, Menschen sowie andere Fahrzeuge vom Computer erkannt. Die weitere Bewegung des Fahrzeugs wird ausgehend von der kategorisierten Umwelt berechnet (ADAC, 2020)

Für den Strassengüterverkehr bedeutet autonomes Fahren, dass die Lkw ohne Fahrer unterwegs sein können

Marktreife

Erste Ideen und Visionen

Vollständige kommerzielle Implementierung

Autonomes Fahren befindet sich noch in der Entwicklungsphase. Nach Angaben von Volkswagen sollen ab 2025 kommerzielle Angebote für Pkw auf den Markt der Automatisierungsstufe 4 kommen (Auto Gewerbe Verband Schweiz, 2019). Die höchste Stufe des autonomen Fahrens, also Stufe 5, wird vermutlich erst nach 2030 marktreif (Doll, 2016). Die Stufen 0 bis 2 des automatisierten Fahrens gibt es bereits, Stufe 3 befindet sich kurz vor der Marktreife. Die Marktreife der Stufen 4 und 5, also das eigentliche autonome Fahren, liegen noch in der Zukunft (Deloitte, 2019).

Verbreitungsgrad

Niedrig

Hoch

Angesichts der Tatsache, dass Autonomes Fahren sich noch in der Entwicklungsphase befindet, ist die Technologie auch noch nicht verbreitet.

SWOT-Analyse

Stärken

- Durch autonomes Fahren lassen sich Kraftstoff- und CO₂-Einsparungen erzielen. Dies ist durch harmonisierte Geschwindigkeitsprofile, optimierte Motorensteuerung und Berücksichtigung der Topographie möglich (Krail et al., 2019).
- Anders als ein Mensch kann der Computer für das autonome Fahren exakt die Folgen von Aktionen berechnen und passgenau auf Gefahrensituationen reagieren (ADAC, 2020).
- Durch vernetztes autonomes Fahren kann der Verkehrsfluss optimiert werden (Rhode, 2020)

Schwächen

- Anders als ein Mensch kann ein Computer keine nonverbale Kommunikation ausführen. So kann ein Computer nicht durch Blickkontakt signalisieren, dass er einen Fussgänger wahrgenommen hat (ADAC, 2020).
- Autonomes Fahren ist ein datenintensiver Prozess: pro gefahrenem Kilometer fallen mehr als 100 Gigabyte Daten an (Mercedes-Benz, o. D.).

Chancen

- Vollständig autonomes kann für den Fahrer einen erhöhten Fahrkomfort bedeuten (Rhode, 2020). Betriebswirtschaftlich ist es auch denkbar, den Fahrzeugführer für andere Aufgaben einzusetzen
- Platooning lässt sich mit autonomen, vernetzten Fahrzeugen besonders gut umsetzen (Nowak et al., 2016).

Risiken

- Es gibt noch Unklarheiten hinsichtlich rechtlicher Regelungen: So ist noch nicht abschliessend geklärt, wer bei Unfällen mit autonom fahrenden Fahrzeugen haftet (Rhode, 2020).



Anbieter



- Das in San Francisco beheimatete Startup Embark wurde 2015 gegründet und baut selbstfahrende Lkws für Fracht- und Logistikdienstleistungen (Crunchbase, o. D.).
- Die Lkws von Embark verwenden eine Kombination aus Radar, Kameras und Tiefensensoren um die Welt um sich herum wahrzunehmen. Durch diese Informationen und künstlicher Intelligenz wird es dem Lkw ermöglicht automatisiert zu fahren (EHS Today, 2018).
- Zurzeit sind die Lkws von Embark mit der zweiten Automatisierungsstufe ausgerüstet. Das Ziel besteht darin die vierte Stufe zu erreichen, bei welcher das Fahrzeug auf begrenzten, spezifischen Autobahnrouen ohne Fahrer operieren kann (EHS Today, 2018).



- Einride ist ein 2016 gegründetes schwedisches Startup, welches sich auf elektrische und selbstfahrende Fahrzeuge spezialisiert hat (Hawkins, 2020).
- Das Unternehmen bietet Lkws in verschiedenen Automatisierungsvarianten an, welche sich in den Bedingungen, unter denen der Lkw autonom fahren kann, unterscheiden. Die erste Variante ist für den Betrieb innerhalb eines definierten geografischen Gebiets ausgelegt, während die zweite Variante per Teleoperation auch ausserhalb eines solchen Bereichs fahren darf. Die dritte Variante ist für ländliche Umgebungen und die vierte Variante für das Fahren auf der Autobahn konzipiert (Hawkins, 2020).



- Das 2015 gegründete Startup TuSimple mit Sitz in San Diego erforscht und testet selbstfahrende Lkws („TuSimple“, 2020).
- Die selbstfahrenden Lkws werden durch Kameras, Radar- und Lidarsensoren gesteuert, welche ihre Daten einer künstlichen Intelligenz liefern (Hitch, 2020).
- Bisher haben die Lkws von TuSimple mehr als 1 Million Meilen gesammelt und sind dabei Strecken für UPS und McLane Co. gefahren. Die Technologie ist noch nicht fehlerfrei, weshalb menschliches Eingreifen sporadisch von Nöten ist (Hitch, 2020).
- Das Ziel des Unternehmens ist die Implementierung von Stufe 4 des autonomen Fahrens, wodurch der Lkw unter den meisten Bedingungen selbst fahren kann („TuSimple“, 2020).

Pilotprojekte

DAIMLER

Name des Projekts	Pilotprojekt von Daimler
Zeitraum des Projekts	2019
Ziel des Projekts	Autonom fahrende Lkw testen
Projektpartner	Daimler, Bosch
Beschreibung	In dem Projekt geht es um das autonome Fahren von Lkw. Selbstfahrende Lkw werden von Daimler als der attraktivere Bereich angesehen als selbstfahrende Autos. Dem Projekt vorausgegangen war die Übernahme des auf autonomen Fahren spezialisierten Unternehmens Torc Robotics. Im Dezember 2019 erfolgte der Startschuss für das Projekt, bei dem eine ganze Flotte von vier automatisierten Fahrzeugen durch die kalifornische Millionenstadt San José fahren.
Ergebnisse	Konkrete Ergebnisse des Projekts wurden nicht veröffentlicht, jedoch plant der Konzern weitere Testfahrten in Deutschland und rechnet mit Serienreife in zwei bis drei Jahren. Ausserdem hat das Unternehmen bereits seit einigen Jahren eine Strassenzulassung in Nevada für einen Inspiration Truck Prototypen.

(Daimler, 2019; Daimler, 2020; Brien, 2020; VDI Verlag, 2020)

CO₂-Einsparpotenzial

Die Einsparungen ergeben sich hier durch zwei Effekte:

Primäre Effekte (fahrzeugbezogene Effizienzpotentiale):

- Harmonisierte Geschwindigkeitsprofile
- Optimierte Motorensteuerung
- Berücksichtigung der Topographie

Sekundäre Effekte (Wirkungen, die sich aus einer Änderung des Verkehrsverhaltens ergeben):

- Veränderungen der Fahrleistungen der Verkehrsmittel und damit dem Modal Split
- Veränderungen in den Anteilen der Verkehrsdichten bzw. des Verkehrsflusses
- Veränderungen der Fahrleistungen durch neue Nutzergruppen
- Veränderungen durch neue, automatisierte und geteilte Mobilitätskonzepte

Autonomes Fahren ist noch in der Entwicklungsphase, die hier genannten CO₂-Einsparungen beziehen sich also auf die fernere Zukunft:

- Folgende Angaben beziehen sich auf die prozentualen CO₂-Einsparungen bei unterschiedlich hohen Penetrationsraten, also wie stark sich autonomes Fahren durchsetzt, und für die Automatisierungsstufen, also welche Stufe von autonomem Fahren angewendet wird:

Automatisierungsstufe	Penetrationsrate		
	Gering	Mittel	Hoch
1	3,4%	4,3%	4,7%
2	3,9%	5,2%	6,0%
3	5,1%	9,3%	13,9%
4	5,1%	9,3%	13,9%
5	6,8%	12,0%	17,0%

Tabelle 10: CO₂-Einsparungen nach Automatisierungsstufe und Penetrationsrate

Fazit: Je höher die Automatisierungsstufe und je grösser die Penetrationsrate, desto grösser die Einsparungen

(Krail et al., 2019, S. 133)



Betriebswirtschaftlicher Mehrwert

Für die Technologie des autonomen Fahrens muss mehr in den neuen Lkw investiert werden: es fallen zusätzliche Kosten von 23'000€ pro Lkw an. Diese Kosten beziehen sich allerdings auf Prognosen des Preises in der Zukunft. Insofern sind diese Kosten also nicht direkt mit denen von Platooning zu vergleichen.

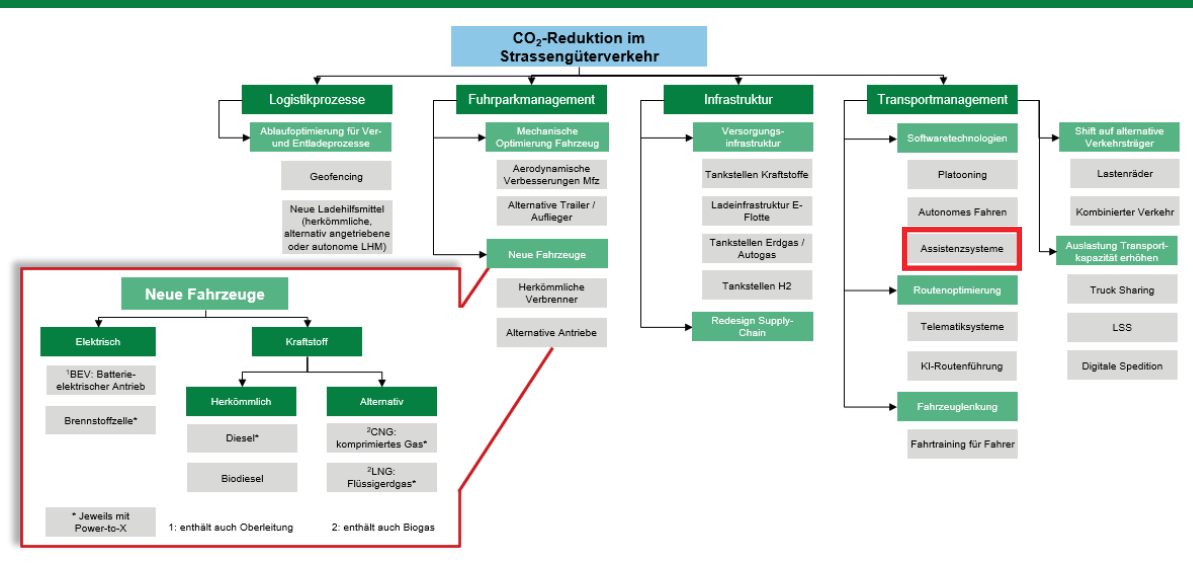
Aber: insgesamt können die Kosten durch autonomes Fahren um 47% sinken. Gründe:

- Wegfall der Lohnkosten (wichtigster Einsparungspunkt, vier Fünftel der Einsparungen)
- Längere Einsatzzeiten möglich (78% der verfügbaren Zeit anstelle von 29%), da Ruhepausen für Fahrer wegfallen
- Keine Fahrerkabine mehr notwendig, allein dadurch Kosteneinsparungen von bis zu 30'000€ pro Fahrzeug (N-TV Nachrichtenfernsehen, 2018)

Eine andere Quelle Einsparungen von 17'000€-32'400€ (Nowak et al., 2016)

Assistenzsysteme

Verortung der Massnahme im Cluster



Definition

Assistenzsysteme sind elektronische Helfer, die den Fahrer in bestimmten Situationen unterstützen sollen. Im Mittelpunkt stehen Sicherheit und Komfort (Mein Autolexikon, o.D.). Es gibt verschiedene Automatisierungslevel von Fahrerassistenzsystemen: informierend, warnend, abblockbar und nicht abblockbar (Elysasi-Pour, 2015, S.14).

Funktionsweise

Es gibt eine Vielzahl von Fahrerassistenzsystemen, darunter Antiblockiersystem, Antriebsschlupfregelung, Abstandsregeltempomat, Spurhalteassistent etc. Diese dienen allerdings alle in erster Linie der Fahrsicherheit und nicht der CO₂-Einsparung (ADAC, 2020).

Fahrerassistenzsystem für eine automatische Regelung der Geschwindigkeit für energieeffizientes Fahren unter Nutzung der Topografie

Fahrerassistenzsysteme für ein automatisches Abbremsen vor einer Geschwindigkeitsbegrenzung (Huelsebusch, 2018).



Marktreife		Verbreitungsgrad	
Erste Ideen und Visionen	Vollständige kommerzielle Implementierung	Niedrig	Hoch
			
Viele Arten von Fahrerassistenzsystemen sind bereits marktreif. Dazu gehören insbesondere Fahrerassistenzsysteme, die der Fahrsicherheit dienen.		Verbreitungsgrad hängt stark von Art des Fahrerassistenzsystems ab. Antiblockiersystem seit 2004 in Neuwagen Pflicht (Mobilitätsmagazin, 2021) Für alle neuzugelassenen Lkws sind AEBS (Advanced Emergency Braking Systems) seit 2018 in Deutschland Pflicht (Deutscher Bundestag, 2016) Neuere Assistenten wie Abstandsregeltempomat, Stauassistent und Linksbiegeassistent haben noch einen deutlich kleineren Verbreitungsgrad (Deutscher Verkehrssicherheitsrat, 2018) Für Fahrerassistenzsysteme, die der CO₂-Einsparung dienen, wurden keine Angaben hinsichtlich des Verbreitungsgrads gefunden. Deswegen wird dieser als noch recht gering eingeschätzt.	
SWOT-Analyse			
Stärken		Chancen	
- Durch geringeren Kraftstoffverbrauch lassen sich sowohl die Kosten als auch die CO₂-Emissionen reduzieren, anders als bei alternativen Antrieben also kein Konflikt zwischen Kosten und CO₂-Emissionen - Neben der Möglichkeit, verbrauchsarmer zu fahren, ist der Hauptnutzen der meisten Fahrerassistenzsysteme die Verbesserung der Fahrsicherheit (ADAC, 2020).		Technische Fortschritte in der Informationstechnologie werden noch effizientere Fahrerassistenzsysteme ermöglichen	
Schwächen		Risiken	
- Sehr begrenztes Potenzial zur Energieeinsparung (u.U. weniger als 2%) - Energie- und CO₂-Einsparung geht zu Lasten der Fahrzeit und eines einheitlichen Verkehrsflusses (unterschiedliche Geschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Steigung)		- Mit steigender Produktverbesserung und komplexeren Systemen werden auch Kosten steigen - Fahrer verlässt sich zu sehr auf das Fahrerassistenzsystem, da er einwandfreies Funktionieren der Fahrerassistenzsysteme erwartet. Besonders in Europa und gerade Deutschland ist diese Erwartungshaltung sehr ausgeprägt (Deutscher Verkehrssicherheitsrat, 2006). - Je nach Land haftet man für das Produkt, besonders in den USA fürchten Hersteller enorme Produkthaftungsansprüche, weswegen die Einführung noch einen weiten Weg vor sich hat (Deutscher Verkehrssicherheitsrat, 2006).	

Anbieter



Bosch

- Passt Fahrerassistenzsysteme, die sich für Pkw bewährt haben, auf Lkw an
- Besonders wichtig für Lkw: Spurhalteassistent
- Hinsichtlich Energieeinsparung und CO₂-Bilanz kein Schwerpunkt auf CO₂-Einsparungen

(Robert Bosch GmbH, o. D.)



ZF Friedrichshafen

- Unterschiedliche Ansätze zu Fahrerassistenzsystemen für Nutzfahrzeuge und Pkw
- Pkw: teilautomatisierter Ansatz, Nutzfahrzeug: vollautomatisiert
- Auch hier keine ausgereiften Modelle von Fahrerassistenzsystemen für CO₂-Einsparungen

(Wildemann, 2020)

Fazit: Die Fahrerassistenzsysteme am Markt konzentrieren sich auf Fahrsicherheit und Fahrerkomfort, Fahrerassistenzsysteme für eine CO₂-Reduktion beschränkt sich bislang auf die wissenschaftliche Literatur; wie in den Interviews allerdings festgestellt wurde, verwendet Berger Logistik bereits Fahrerassistenzsysteme zur Kraftstoffeinsparung unter Ausnutzung der Topografie

CO₂-Einsparpotenzial



Einsparen von Emissionen durch frühzeitiges Ausrollen oder Energierückgewinnung durch Rekuperation vor einer Ortseinfahrt:

- Einsparpotenzial von bis zu **65%**
- Dieses hohe Einsparpotenzial allerdings nur bei Rekuperation und über den Zeitverlauf des Bremsvorgangs, über Gesamtfahrt relativiert sich dieser Wert, es kann auch insgesamt Einsparungen von gerade einmal **1,5%**

(Huelsebusch, 2018, S. 51)



Einsparen von Emissionen durch Anpassen an Topografie:

- Vor einer Steigung Beschleunigen
- In der Steigung an Geschwindigkeit verlieren
- Bei Abfahrt schneller werden, aber mit wenig Motorleistung
- Je nach Topografie und zulässiger Geschwindigkeitsdifferenz lässt sich eine Einsparung von beispielsweise **13%**



erzielen (allerdings unter Zeitverlust)

Betriebswirtschaftlicher Mehrwert

Kostenanalyse

Die Kosten für einfache Fahrerassistenzsysteme für Fahrsicherheit liegen in der Herstellung im zweistelligen Bereich, werden aber allgemein für dreistellige Beträge verkauft:

- Einfache Fahrerassistenzsysteme kosten 150-200€. (Automobilwoche, 2015)
- Es wurden ansonsten wenige Angaben gefunden, wie viel Fahrerassistenzsysteme kosten. Die Kosten lassen sich allerdings über die Reparaturkosten abschätzen: Summiert man die Reparaturkosten, wenn an jeder Stelle, an der Sensoren angebracht sind, so kommt man auf Reparaturkosten von 7650\$. Dies ist also ein guter Indikator, dass Fahrerassistenzsysteme inklusive der benötigten Sensoren deutlich teurer sind. (Automotive Fleet Magazine, 2018) Mit höheren Kosten ist auch der Break-Even-Punkt deutlich später als im obigen Beispiel. Allerdings lassen sich mit Fahrerassistenzsystemen auch Unfälle und damit erhebliche Kosten vermeiden. Ausserdem sollten Synergien berücksichtigt werden: Ist die Sensorik einmal eingebaut, so kostet ein zusätzliches Fahrerassistenzsystem vermutlich weniger.

Durch technologische Fortschritte ist zu erwarten, dass Fahrerassistenzsysteme immer günstiger werden.

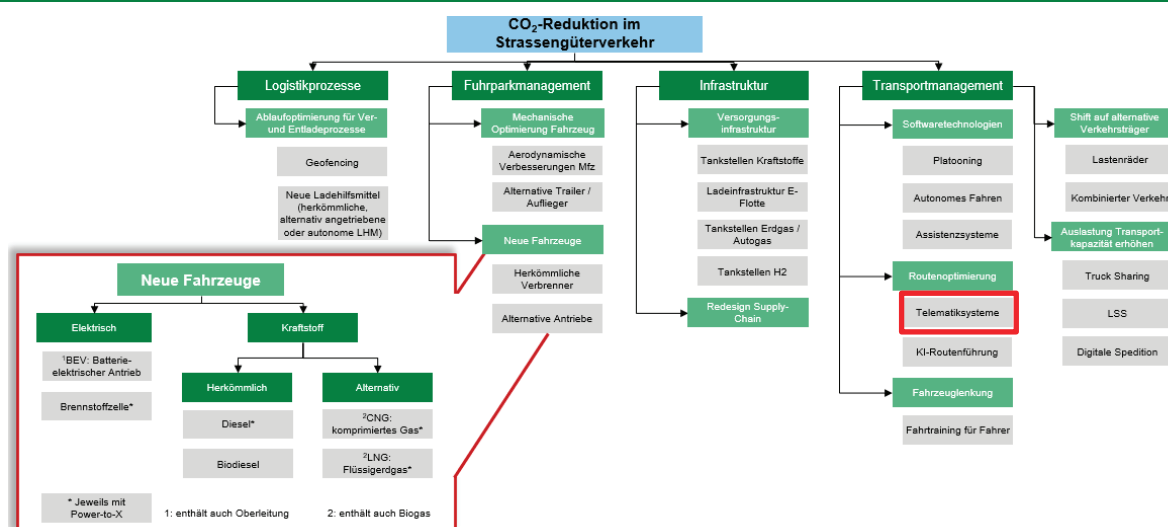
- Beispielrechnung mit selbst gewählten Annahmen (wegen Quellenknappheit):
- Kraftstoffeinsparung von 2%
- Kosten des Fahrerassistenzsystems von 500€
- Dieselskosten von 33ct/km (aus Schöni Tabelle)

Fazit: Für diese Annahmen lohnt sich das Fahrerassistenzsystem nach einer Fahrstrecke von 76'000km

11.3.4.2 Routenoptimierung

Telematiksysteme

Verortung der Massnahme im Cluster



Definition

Der Begriff Telematik steht für die Integration von Telekommunikation und Informatik. Es handelt sich also um Systeme, die Telekommunikation und technische Einrichtungen zur Ermittlung, Speicherung und/oder Verarbeitung von Daten und Informationen miteinander vernetzen. Der Begriff der Telematik hat vor allem Verwendung im Verkehrsbereich gefunden (Lackes et al., 2018). Im Verkehr werden Telematiksysteme z.B. Datenkommunikation, Ortung und Navigation eingesetzt (Baumgartner & Léonardi, 2004).

Funktionsweise

Da es eine Vielzahl an Telematiksystemen gibt, (Baumgartner & Léonardi, 2004) lässt sich nicht einfach eine allgemeingültige Funktionsbeschreibung herausarbeiten

Wichtiger Bestandteil eines Telematiksystems ist die Black Box. In ihrer Basisversion ist sie ein vollautomatisches nicht interaktives System, mithilfe dessen in vorher festgelegten Zeit- und Kilometerintervallen die Positionsdaten des Lkw erfasst werden. Die Black Box kann aber auch an die Fahrzeugelektronik angebunden werden und damit technische Informationen erfassen. Zu diesen technischen Daten gehören beispielsweise der Kraftstoffverbrauch, der Tankfüllstand und die Benutzung des Tempomats. Die Blackbox kann ausserdem an den Tachographen angeschlossen werden. Dadurch sind neben der Fahrererkennung auch die Lenk- und Ruhezeiten nachvollziehbar. Ausserdem kann aufgezeichnet werden, in welchem Zustand der Lkw sich befindet, also ob er fährt und falls er steht, warum er sich nicht fortbewegt (Ruhezustand, Bereitschaftszeit, Arbeitszeit etwa beim Be- und Entladen). Neben der Blackbox für Zugmaschinen gibt es auch Blackboxen für die Trailer. Diese erfassen Daten über den Verschleiss, Reifenluftdruck und Bremsbelege.

Telematiksysteme können zur Reduzierung der CO₂-Emissionen beitragen, indem die Abläufe in der Logistik effizienter gestaltet werden: Dazu gehören eine stärkere Bündelung, eine höhere Auslastung der Lkw und die Verminderung von Umwegen. All diese Punkte führen zu einer gesteigerten Fahrleistung und damit anteilig geringeren Emissionen pro Transport (Industrie- und Handelskammer Region Stuttgart, 2011).

Telematiksysteme können auch eingesetzt werden, um den CO₂-Ausstoss zu tracken (Dataforce, 2018).



Marktreife

Verbreitungsgrad

Erste Ideen und Visionen

Vollständige kommerzielle Implementierung

Niedrig

Hoch

Angesichts der Tatsache, dass es ein grosses Angebot an Fahrerassistenzsystemen gibt, ist die Marktreife von Telematiksystemen als sehr hoch anzusetzen. Am hohen Verbreitungsgrad ist ebenfalls zu erkennen, dass die Marktreife sehr hoch ist. Ebenfalls für die hohe Marktreife spricht, dass die Technologie schon seit längerer Zeit auf dem Markt verfügbar ist. So verkauft der Anbieter Fleetboard bereits seit dem Jahr 2000 Telematiksysteme für den Nutzfahrzeugbereich (Telematik-Markt, o. D.).

Telematiksysteme sind in Lkw-Flotten schon recht verbreitet: 42% der Unternehmen mit 50-99 Fahrzeugen und 47% der Unternehmen mit einem Fuhrpark von mehr als 100 Fahrzeugen verwenden Telematiksysteme und/oder Fuhrparkmanagement-Software (Stand 2018). Das Wachstum betrug damit in dem Jahr 3,3 bzw. 1,8% (Dataforce, 2018).

SWOT-Analyse

Stärken

Chancen

• Es können CO₂-Einsparungen erzielt werden. Vorteilhaft ist hier besonders, dass die Emissionseinsparungen auch mit Kosteneinsparungen einhergehen. Der Einsatz von Telematiksystemen ist also ökonomisch und ökologisch sinnvoll (Baumgartner & Léonardi, 2004).

• Telematiksysteme steigern die Zuverlässigkeit als auch die termingerechte Verfügbarkeit und Qualität von Informationen; der gesamte Prozess wird transparenter

• Unfälle können besser vermieden werden. (Wassmann, 2017) So wird durch das Sammeln der Daten am Fahrzeug frühzeitig erkannt, wenn technische Störungen vorliegen können (Predictive Maintenance).

• Bei Gefahrguttransporten können Telematiksysteme die Sicherheit erhöhen, indem die Güter und das Fahrzeug durchgehend überwacht werden (Wassmann, 2017).

• Die Fehlerquote bei der Transportplanung, besonders bei der Auftragsübermittlung, kann reduziert werden (Wassmann, 2017).

Schwächen

Risiken

• Die Menge an CO₂-Emissionen, die sich einsparen lässt, ist sehr begrenzt. Ein Beispielwert für die Höhe der CO₂-Einsparungen hier sind 5% (Baumgartner & Léonardi, 2004).

• Bei der Einführung von Telematiksystemen fallen hohe Anschaffungskosten für Hard- und Software an. Weitere Kosten fallen ausserdem an, wenn eine Überholung der Technologie notwendig ist. Zu diesen Kosten kommen zusätzlich die Personal- und Schulungskosten (Wassmann, 2017).

• Telematiksysteme greifen auf vorhandene Infrastrukturen wie das Internet zurück; bei Ausfällen kann nicht auf die Telematikfunktionen zurückgegriffen werden

• Bei der Einführung von Telematiksystemen besteht ein Risiko, weil der Nutzen der neuen Technologie nicht sofort erkennbar ist. Es besteht das Risiko, dass der volle Nutzen der Technologie nicht ausgeschöpft werden kann, weil der Markt nicht entsprechend der eigenen Erwartungen reagiert und Kunden die Leistungsqualität, die ihnen mithilfe von Telematiksystemen geboten werden kann, nicht erkennen (Wassmann, 2017).



Anbieter



Webfleet Solutions

- Das Unternehmen, das ehemals unter dem Namen Tomtom Telematics bekannt war, bietet Telematiksysteme an. Dabei kann ein Online-Rechner verwendet, um die potenzielle Kostenersparnis zu berechnen (Webfleet Solutions, o. D.-b)
- Das Unternehmen ist der von Flottenbetreibern am meisten genutzte Anbieter für Telematiksysteme (Dataforce, 2018)
- Die vom Unternehmen genannten Vorteile für die Verwendung von Telematiksystemen sind Kenntnis über den Aufenthaltsort der Fahrzeuge, Reduzierung der Kraftstoff- und Wartungskosten, Optimierung der Geschäftsprozesse und Routen sowie die Verbesserung des Service
- Die genannten Kraftstoffeinsparungen beziehen sich insbesondere auf Echtzeitfeedback für die Fahrer



Daimler Fleetboard

- Das Unternehmen ist auf Nutzfahrzeug-Telematik spezialisiert. Seit der Markteinführung im Jahr 2000 hat das Unternehmen rund 220'000 Fahrzeuge von mehr als 7'000 Kunden ausgestattet (Telematik-Markt, o. D.)
- Es wird mit den Vorteilen von Telematiksystemen hinsichtlich einer höheren Produktivität, geringeren Kosten und einer höheren Sicherheit geworben.
- Wie bei Webfleet Solutions werden Kraftstoffeinsparungen versprochen (hier sogar bis zu 15%), indem der Fahrstil analysiert und bewertet wird (Daimler FleetBoard, 2016)



CO₂-Einsparpotenzial

Je nach Quelle unterscheidet sich das Einsparpotenzial an CO₂ durch die Verwendung von Telematiksystemen:

- 2-10%, bester Schätzwert 8 % (Baumgartner & Léonardi, 2004)
- 10% (Kuther, 2010)
- 15% (Daimler FleetBoard, 2016)
- Senkung des Verbrauchs der Flotte von 37l/100km auf 32l/100km (Industrie- und Handelskammer Region Stuttgart, 2011)

Die Einsparungen werden allerdings teilweise auf ähnliche Weisen wie bei Fahrertraining, Fahrerassistenzsystemen und autonomem Fahren erreicht (sparsamerer Fahrstil). Bei der Implementierung mehrerer dieser Massnahmen ist also davon auszugehen, dass der Gesamteffekt nicht deutlich grösser ist als der einer einzelnen Massnahme

Betriebswirtschaftlicher Mehrwert

Investitionskosten für ein Telematiksystem:

Die Kosten für ein Telematiksystem variieren abhängig vom Funktionsumfang. So sind einfache Ausführungen bereits für weniger als **200€** erhältlich, für umfangreichere Telematiksysteme müssen aber auch mehr als **3000€** gezahlt werden (Fahrzeugortung.com, 2016)

Kosteneinsparungen durch den Einsatz von Telematiksystemen:

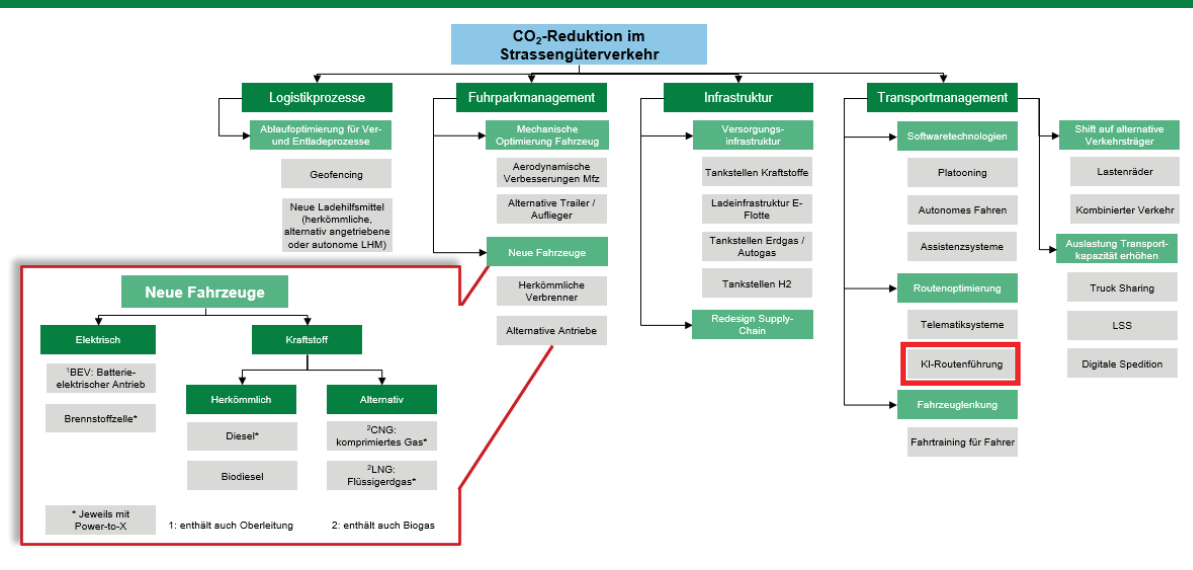
- Da die zuvor genannten CO₂-Einsparungen durch geringere Treibstoffverbräuche zustande kommen, bedeutet dies auch geringere Treibstoffkosten (also 2-15%)
- Mithilfe eines Online-Rechners von Webfleet Solutions (Webfleet Solutions, o. D.-a) lassen sich die Kosteneinsparungen berechnen. Die Ergebnisse sind natürlich kritisch zu hinterfragen, da es sich hier auch um Werbung für die Telematiksysteme handelt. Ebenfalls hinterfragen sollte man, warum laut dem Rechner keine zusätzlichen Kosten (Investitionen) anfallen.

Beispielrechnung: Für 50 Lkw mit einer durchschnittlichen Fahrleistung von 100'000km pro Jahr ergeben sich jährliche Einsparungen von 345'590 CHF

Fazit: Telematiksysteme sind sowohl ökonomisch als auch ökologisch als sinnvoll zu bewerten.

KI-Routenführung

Verortung der Massnahme im Cluster



Definition

Der Begriff der künstlichen Intelligenz wurde ursprünglich als Forschungsgebiet mit der Vision vorgeschlagen, dass es für Maschinen möglich sein wird zu sprechen, abstrakte Konzepte zu bilden und Probleme zu lösen, die bislang nur Menschen lösen konnten (Hecker et al., 2017). Es gibt viele Definitionen von künstlicher Intelligenz. Eine mögliche Definition ist: «Künstliche Intelligenz simuliert menschliche Intelligenz mit Maschinen, insbesondere Computersystemen. Dies umfasst das Lernen (die Erfassung von Informationen und Regeln für die Verwendung von Informationen), die Schlussfolgerung (die Verwendung der Regeln, um ungefähre oder endgültige Schlussfolgerungen zu ziehen) und die Selbstkorrektur» (ComputerWeekly, o. D.). Bei der KI-Routenführung wird künstlicher Intelligenz eingesetzt, um Routen zu optimieren (Hanseatische Software-Entwicklungs- und Consulting GmbH, o. D.).

Funktionsweise

Maschinelles Lernen ist die Kerntechnologie der künstlichen Intelligenz. Anders als bei der einfachen Programmierung, wo das Programm eine konkrete Berechnungsvorschrift erhält, gibt man dem Computer Beispieldaten. Mithilfe von Lernmethoden bzw. -algorithmen werden statistische Regelmässigkeiten extrahiert, die in Form von Modellen dargestellt werden. Diese Modelle können auf neue, zuvor noch nicht gesehene Daten reagieren, indem sie sie in Kategorien einordnen und Vorhersagen sowie Vorschläge generieren (Hecker et al., 2017).

Die KI lässt sich in der Transportlogistik einsetzen, indem ein Prognoseverfahren entwickelt wird, das Transportvolumen auf unterschiedlichen Ebenen (Kunde, Niederlassung, Unternehmen) sowie Horizonten (Tage, Woche, Monate) vorhersagt. Diese Vorhersagen können in der Tourenplanung genutzt werden, um gezielt Sendungsvolumen zu konsolidieren. Beispielsweise kann eine Entscheidung, die durch die KI gefällt wird, so aussehen, dass ein Knoten einen Tag früher oder später anfährt als ursprünglich geplant. Ein Resultat der Anwendung von KI kann sein, dass die Leerfahrten reduziert werden (Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen, o. D.).



Marktreife

Erste Ideen und Visionen

Vollständige kommerzielle Implementierung

Künstliche Intelligenz besitzt erste marktreife Anwendungen (Industrial AI, 2020). Dies heisst jedoch nicht, dass sich auch der Einsatz von KI für den Einsatz in der Transortlogistik kurz vor der Marktreife befindet. Angesichts der Tatsache, dass ein Pilot-Projekt über Tourenplanung mittels KI für den Zeitraum von 2020 bis 2023 angesetzt ist (Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen, o. D.-a), ist die Marktreife als gering einzustufen.

Verbreitungsgrad

Niedrig

Hoch

Die Verbreitung der Anwendung von KI für die Routenplanung ist noch sehr gering. So nutzen gerade einmal 1% der Unternehmen KI für die Planung von Transportrouten (Bitkom, o. D.).

SWOT-Analyse

Stärken

- Vermutungen gehen davon aus, dass die Leerfahrten um bis zu 15% reduziert werden können (Industrial AI, 2020). Das bedeutet also sowohl eine Einsparung an CO₂ als auch Kostenvorteile
- Routenfindung beruht nicht mehr auf der Erfahrung des Fahrers – Neue Fahrer sind somit direkt voll einsatzfähig

Schwächen

- Das Trainieren einer KI ist allgemein mit einem hohen Energieverbrauch verbunden. Das Trainieren einer KI (z.B. für die Spracherkennung) kann so viel CO₂ ausstossen wie fünf Pkw über ihre Lebenszeit (Hao, 2019).

Chancen

- Weniger Leerfahrten durch den Einsatz von KI (Industrial AI, 2020) können dazu führen, dass die Verkehrswege weniger stark ausgelastet sind und damit den verbleibenden Fahrzeugen ein besserer Verkehrsfluss ermöglicht wird

Risiken

- Der Einsatz von KI allgemein wirft ethische Fragen auf (z.B. Diskriminierung bei der Beurteilung der Kreditwürdigkeit von Personen) (Schürmann Rosenthal Dreyer Rechtsanwälte, 2020). Hier sollte also nicht völlig ausgeschlossen werden, dass der Einsatz von KI in der Logistik auch mit ethischen Problemen einhergehen kann.

Pilotprojekte



Name des Projekts	KITE
Dauer des Projekts	Juni 2020 – Juni 2023
Ziel des Projekts	Durch den Einsatz von KI soll die Anzahl an Leerfahrten reduziert und damit eine Einsparung an CO ₂ -Emissionen erzielt werden
Projektpartner	Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen, Opitool GmbH, BLG Logistics Group AG & Co. KG, Schmahl & Stoepel GmbH
Beschreibung	Die künstliche Intelligenz wird auf mehrere Arten eingesetzt. Zum einen werden Prognoseverfahren entwickelt, um Transportvolumen auf verschiedenen Prognose-Ebenen (Kunde, Niederlassung, Unternehmen) sowie Horizonten (Tage, Wochen, Monate) vorherzusagen. Anhand dieser Vorhersagen werden Touren geplant, um Sendungsvolumen zu konsolidieren. Beispielsweise kann ein Lkw einen Knoten in einem Netzwerk einen Tag früher oder später anfahren. Ausserdem wird ein Verfahren zur Langfristprognose entwickelt, um gezielt Stellen zur Netzwerkoptimierung zu identifizieren.
Ergebnisse	Angesichts der Tatsache, dass das Projekt erst vor kürzerer Zeit begonnen hat, sind noch keine Testergebnisse veröffentlicht worden.

(Klukas et al., 2019)

CO₂-Einsparpotenzial und betriebswirtschaftliche Kosten

Hier wurden bisher nur wenige Angaben gefunden. Die einzige Angabe ist die Vermutung, dass die Leerfahrten um bis zu 15% reduziert werden können (Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen, o. D.). Nimmt man einen Anteil an Leerkilometern von 23% an (Scherf & Dörfelt, 2018) und dass der Verbrauch bei einer Leerfahrt ungefähr zwei Dritteln des Verbrauchs einer vollen Fahrt entspricht (Spielmann et al., 2011), so ergibt sich die Einsparung über den gesamten Einsatz:

Der ursprüngliche relative Verbrauch beträgt: $0,77 * 1 + 0,23 * \frac{2}{3} = 0,92\bar{3}$

Beim neuen relativen Verbrauch wird die Anzahl an Leerfahrten reduziert, nämlich um 15%, also bleiben nur 85% der ursprünglichen Leerfahrten, die Anzahl an beladenen Fahrten bleibt hingegen gleich: $0,77 * 1 + 0,23 * 0,85 * \frac{2}{3} = 0,900\bar{3}$

Vergleicht man nun die Änderung der Emissionen, so kommt man auf $\left(\frac{0,92\bar{3}}{0,900\bar{3}} - 1\right) * 100\% \approx 2,55\%$

Durch die Reduktion der Leerfahrten um 15% mithilfe von KI-Routenplanung lässt sich also eine Reduktion der CO₂-Emissionen um 2,55% erzielen

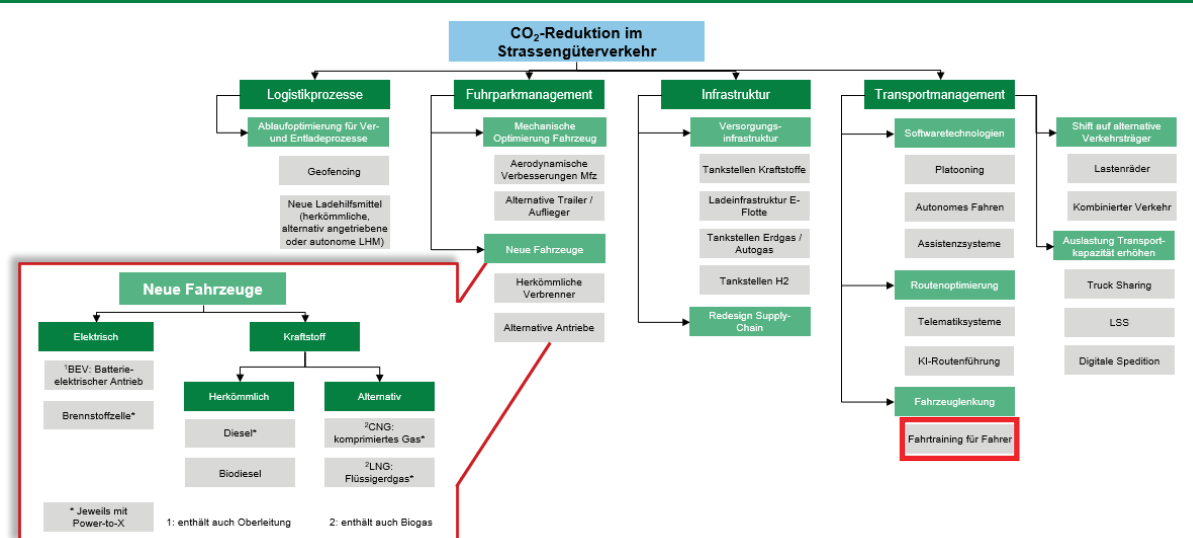
Da die CO₂-Einsparungen durch geringere Kraftstoffverbräuche erzielt werden, bedeutet dies, dass die Kosten für den Treibstoff ebenfalls um 2,55% zurückgehen werden.

Nicht berücksichtigt in dieser Analyse sind die CO₂-Emissionen durch den Energieverbrauch beim Trainieren der KI sowie die Investitionskosten für die KI.

11.3.4.3 Fahrzeuglenkung

Fahrertraining

Verortung der Massnahme im Cluster



Definition

Bei Fahrertrainings wird der Fahrer/Fahrzeugführer wird bei Testfahrten, computer-basierten Trainings (CBT) sowie mediengestützten Vorträgen geschult (DEKRA Akademie, o. D.) Kern der Schulungen ist die Vermittlung von unterschiedlichen Massnahmen hinsichtlich einer Fahrweise mit geringerem Spritverbrauch (und damit auch geringeren CO₂-Emissionen). Es ist möglich das Fahrtraining neben der Schulung am Fahrzeug auch virtuell in einem Fahrsimulator durchzuführen. (DEKRA Akademie, o. D.)

Funktionsweise

Massnahmen für ein effizienteres Fahren:

- Fahren in niedertourigen Motorumdrehungen
- Vorausschauendes Fahren (z.B. rechtzeitiges Reagieren auf bevorstehende Geschwindigkeitsbegrenzungen), kein plötzliches Bremsen oder Beschleunigen
- Anpassung des Fahrstils an die Leistungscharakteristik des Motors (MAN Truck & Bus Schweiz, 2008)
- Vorausschauendes Fahren hinsichtlich der Topographie: So ist es sinnvoll, vor einem hohen Berg die Geschwindigkeit zu erhöhen. Vor der Kuppe ist vom Gas runterzugehen (Rosenberger, 2013)

Marktreife

Erste Ideen und Visionen

Vollständige kommerzielle Implementierung

Vielseitiges Angebot an Fahrertrainings, das sich speziell auf Lkw-Fahrer und das Einsparen von Kraftstoff bezieht am Markt vorhanden. Angesichts dieses grossen und vielseitigen Angebots wird die Marktreife mit «einer hohen technischen Reife» bewertet.

In der Praxis existiert auch bereits virtuelles Fahrertraining, unterstützt durch Simulatoren (DEKRA Akademie, o. D.).

Verbreitungsgrad

Niedrig

Hoch

Eine Umfrage ergab, dass «nur» ein Fünftel aller befragten Transportunternehmen Schulungen zum Fahrertraining aktiv durchführen bzw. im Fokus haben (Rosenberger, 2013). Der Verbreitungsgrad wird daher eher mittel gewertet.

SWOT-Analyse

Stärken

- Gutes Verhältnis aus Kosten und Nutzen: Fahrerschulungen kosten in Hinblick auf den damit verbundenen Kraftstoff-Einsparungen, wenig (Rosenberger, 2013)
- Fahrerschulungen sind sowohl ökonomisch als auch ökologisch sinnvoll: Es können durch die Kraftstoffeinsparungen sowohl Kosten- als auch CO₂-Einsparungen erzielt werden
- Fahrzeugschäden werden durch Fahrerschulungen ebenfalls (um etwa 5%) präventiv reduziert, (DVZ, 2016)

Schwächen

- Begrenztes Potenzial zur Energieeinsparung (etwa 5%) (DAF Trucks, o. D.)
- Von den Fahrern Gelerntes kann mit der Zeit wieder verlorengehen. Laut Experten geht der Lerneffekt insbesondere verloren, wenn Firmenchefs Änderungen nicht ebenfalls verinnerlichen

Chancen

- Neue Antriebstechnologien lassen sich mit Fahrerschulungen kombinieren, z.B.: Fahrertraining für BEV, bei dem gelernt wird, wie gebremst werden muss, um maximale Rekuperationsenergie zurückzugewinnen (FOCUS Online, 2020).
- Durch eine transparente Analyse der Fahrtdaten, erhoben etwa auf Basis von Telematiksystemen, erhält der Fahrer einen Ansporn, verbrauchsarm zu fahren (DAF Trucks, o. D.). Incentivierung (monetär oder anderweitig) kann das «gewünschte» Verhalten nachhaltig bestärken.
- Der Umgang mit neuartigen Fahrerassistenzsystemen bspw. zur Treibstoffeinsparung kann mit Fahrerschulungen kombiniert unterrichtet werden

Risiken

- Autonomes Fahren kann Fahrerschulungen langfristig überflüssig machen. Ebenso andere Technologien wie Assistenzsysteme, da der Fahrer weniger aktiv in die Fahrt eingreift und somit sein Einfluss sinkt. Beispiel: Ein Fahrer kann Kraftstoffeinsparungen gegenüber einem Tempomat ohne GPS-basierter Topographie-Erkennung erzielen (DAF Trucks, o. D.). Kennt das Assistenzsystem hingegen auch die Topographie, so geht dieser Vorteil des Fahrers verloren.



Anbieter



Scania

- Bietet Fahrertrainings an, die sich ausdrücklich auch auf das Einsparen von Treibstoff und CO₂-Emissionen beziehen
- Fahrertraining bezieht sich auch auf die richtige Nutzung von Fahrerassistenzsystemen
- Beim Training werden Fahrtdaten wie Schubbetrieb, Leerlauf und vorausschauendes Fahren analysiert und Verbesserungsvorschläge gegeben

(Scania Deutschland, o. D.)



DAF

- Bietet Fahrertraining an, das sich in erster Linie auf Kraftstoffverbrauch und CO₂-Reduktion konzentriert
- Es werden Kraftstoffeinsparungen von 3-5% angegeben
- Weitere Vorteile des Fahrertrainings sollen eine verbesserte Gesundheit und Sicherheit des Fahrers sowie eine längere Fahrzeugbetriebszeit sein

(DAF Trucks, o. D.)

Fazit: Anders als bei Fahrerassistenzsystemen gibt es bereits heute mehrere Fahrertrainings, die ausdrücklich der Kraftstoff- und CO₂-Einsparung dienen, die Höhe der Einsparungen wird bei etwa 5% beziffert.

Pilotprojekte



Name des Projekts	
Zeitraum des Projekts	Seit 2016
Ziel des Projekts	Durch Fahrertraining soll sowohl der Treibstoffverbrauch als auch die Reparaturkosten gesenkt werden. Durch die Digitalisierung soll das Fahrertraining optimiert werden.
Projektpartner	Nothegger Transport Logistik GmbH, Sifat Road Safety GmbH
Inhalt	Das Logistikunternehmen hat rund 400'000€ in einen Hightech-Lkw Simulator investiert. Vier Monate lang arbeitete der Hersteller (Sifat Road Safety GmbH) an dem Simulator, mit dem verschiedene Situationen für Fahr-, Verkehrs- und Witterungssituation trainiert werden können. Der Simulator hat gegenüber Fahrertraining am Real-Lkw den Vorteil, dass kein Treibstoff verbraucht wird. Aufgrund der grossen Anzahl an Personen, die bei Nothegger als Fahrer angestellt sind, rentierte sich die Anschaffung eines eigenen Simulators. Nothegger plant, zukünftig auch selbst Fahrertrainings für andere Unternehmen anzubieten.

(DVZ, 2016)

CO₂-Einsparpotenzial

Die Höhe der «versprochenen» Einsparungen schwankt:

DAF:	3-5%
Shell Studie	5%
Nothegger	5%
MAN ProfiDrive:	10%
eurotransport:	5-10%

Beispielrechnung CO₂-Einsparung durch Fahrertraining:

Annahmen:

- Verbrauch von 30l/100km
- 5% Kraftstoffeinsparung
- Jahresfahrleistung von 100'000km
- Well-to-Wheel-Emissionen Diesel: 3,08kg CO₂/Liter

$$\text{Einsparungen: } \frac{30l}{100km} * 100'000km * 5\% * 3,08kg \frac{CO_2}{l} = 4'620kg$$

Für dieses Beispiel lassen sich durch Fahrertraining in einem Jahr mehr als 4t CO₂ einsparen.

(DAF Trucks, o. D.; MAN Truck & Bus Schweiz, 2008; Rosenberger, 2013; Touring Club Schweiz, o. D.)

Betriebswirtschaftlicher Mehrwert

- Kosten im dreistelligen Bereich pro Person (Touring Club Schweiz, o. D.)
- Es wird allerdings versprochen, dass der Verbrauch der Fahrer gesenkt werden kann, damit also sowohl umwelttechnisch als auch betriebswirtschaftlich sinnvoll

Beispielrechnung Kosteneinsparung durch Fahrertraining:

Annahmen:

- 400CHF für Fahrtraining (Touring Club Schweiz, o. D.) für Vergleich Grössenordnung
- 0,36CHF pro km Kraftstoffkosten für Lkw
- 5% Einsparung

$$\text{Break-Even-Point: } 400CHF = 0,36CHF/km * 5\% * x$$

- Der Break-Even-Point ist bei $x=22222km$ erreicht

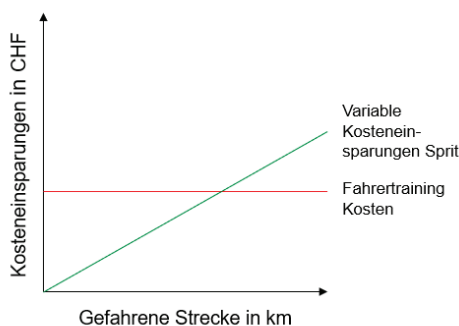


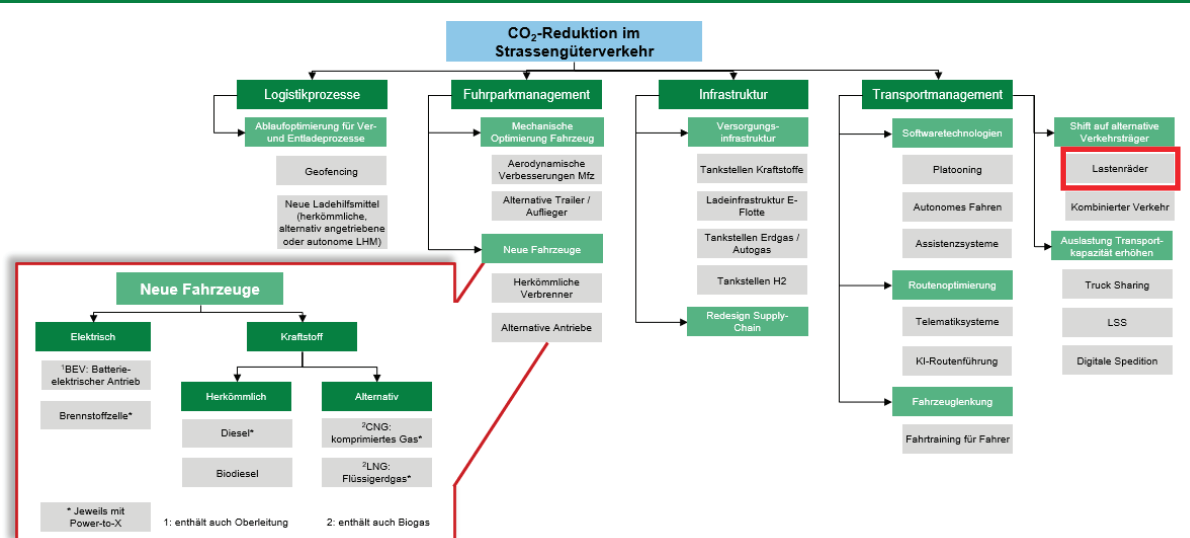
Abbildung 42: Kosten Nutzen Vergleich des Fahrertrainings (eigene Darstellung)

(Touring Club Schweiz, o. D.)

11.3.4.4 Shift auf alternative Verkehrsträger

Lastenräder

Verortung der Massnahme im Cluster



Definition und Funktionsweise

Lastenräder sind Fahrräder, welche zur Beförderung von Lasten genutzt werden können. Im breiteren Verständnis ist nur der Transportzweck relevant, also werden auch klassische Fahrräder, welche für den Transport verwendet werden dazugezählt (Cargobike.jetzt, o. D. -b). Im engeren Verständnis: gehört neben dem Transportzweck auch die spezielle Form (Rahmenform weicht deutlich von normalen Fahrrädern ab, da speziell für Transport konstruiert) dazu.

Es gab lange keine rechtlich verbindliche Definition von Lastenrädern (Cargobike.jetzt, o. D. -b), erst seit 2020 gibt es in Deutschland eine Norm, die als erste Prüfverfahren und Sicherheitsanforderungen für Lastenräder ohne «e» festlegt (Beckendorff, 2020). Nach dieser Norm ist ein Lastenrad auf ein Gewicht von 250kg beschränkt und darf ausschliesslich per Muskelkraft bedient werden. Unterstützt ein Elektromotor die Fahrt, so darf dessen Leistung 250W nicht überschreiten und nur bis zu einer Geschwindigkeit von 25km/h die Fahrt unterstützen (Deutsches Institut für Normung, 2019).

Als Synonym für ein Lastenrad wird häufig Cargobike verwendet: Verfügt das Lastenrad zusätzlich über einen elektrischen Antrieb, so spricht man von einem eCargobike (Cargobike.jetzt, o. D. -b).

Marktreife		Verbreitungsgrad	
Erste Ideen und Visionen	Vollständige kommerzielle Implementierung	Niedrig	Hoch
Lastenräder für den Verteilerverkehr gehen zunehmend in die Marktreife über. So hat das Unternehmen ONO 2019 im Rahmen von zwei Pilotprojekten mit Hermes und Liefery die nächste Hürde in Richtung Marktreife überwunden (Reichel, 2019). Für das Jahr 2021 sind Bestellungen für Lieferungen in die Städte Berlin, München und Leipzig möglich (Onomotion, o. D.) Es sind aber bereits heute viele Angebote für Lastenräder zu finden, die Marktreife hängt also insbesondere von der individuellen Konfiguration des Lastenrads ab Das Marktpotenzial von Lastenrädern wird auf 30% der Sendungen im urbanen Raum eingeschätzt (Zeitler, 2018).		Die Verbreitung von Lastenrädern steigt stark an: Im Jahr 2018 wurden in Europa 39'000 E-Lastenrädern verkauft, das sind 17'000 mehr als 2017 (Reidl, 2019) und damit ein Wachstum von 77% innerhalb eines Jahres In Europa wurden gemäss Angaben von 38 Lastenrader-Marken 2018 insgesamt 17'785 Lastenräder verkauft, 28'532 im Jahr 2019 und für das Jahr 2020 wird ein Verkauf von 43'610 Lastenräder prognostiziert. Damit kommt man für das Jahr 2019 auf ein Wachstum von 60% und für das Jahr 2020 von 53% (Velototal, 2020). Vergleicht man allerdings diese Zahlen mit der Anzahl an verkauften Sprintern in Deutschland (mehr als 300'000 in Deutschland allein im Jahr 2019), so fällt doch der geringe Verbreitungsgrad von Lastenräder im Vergleich zu Sprintern auf (Association des Constructeurs Européens d'Automobiles, 2020). Besonders verbreitet sind Lastenräder in Deutschland (16 von 38 Herstellern), bedeutend im Verhältnis zur Grösse auch Dänemark (4 von 38)	
SWOT-Analyse			
Stärken - Lastenräder im Stadtverkehr sind emissionsfrei (Reidl, 2019) (sowohl CO₂-Emissionen als auch Stickoxide), durch das geringere Fahrzeuggewicht ist auch anzunehmen, dass die Herstellungsemissionen geringer sind, vgl. Formel CO₂-Emissionen durch Fahrzeugherstellung - Für das Fahren eines Lastenrads ist kein Führerschein notwendig - Es gibt (zeitlich begrenzte) Kaufprämien für Lastenräder. Die Höhe dieser Prämien hängt von der Region ab (Cargobike.jetzt, o. D.-a).		Chancen - Das steigende Arbeitsvolumen der Paketzusteller und des eCommerce insgesamt (bspw. durch Unternehmen wie Amazon) lässt auch den potenziellen Markt für Lastenräder wachsen (Reidl, 2019). - Lastenräder können Problemen im urbanen Verkehr wie Stau, Parkplatznot und Fahrverboten (wegen zu hoher Emissionswerte) entgegenwirken (Reidl, 2019).	
Schwächen - Es gibt häufig keine Infrastruktur, die speziell auf Lastenräder angepasst sind (z.B. zu schmale Radwege) (Reidl, 2019). - Im Vergleich zu einem Sprinter ist die Nutzlast eines Lastenrads recht klein: das Gesamtgewicht ist auf 250kg beschränkt, damit ist die transportierte Ladung je Fahrer recht gering, auch die zugelassene Höchstgeschwindigkeit von 25km/h macht erkenntlich, dass das Lastenrad nur für kurze Distanzen geeignet ist. Man braucht also unter Umständen mehrere Lastenräder, um einen Sprinter zu substituieren		Risiken - Mehr Lastenräder bedingt eine höhere Anzahl an Fahrern. In der Logistikbranche herrscht allerdings jetzt bereits ein Fahrermangel (Reidl, 2019). - Statistiken legen die Vermutung nahe, dass Fahrzeugführer eines Lastenrads wachsenden Gefahren im Strassenverkehr ausgesetzt sind: Während die Anzahl an Verkehrstoten bei Nutzfahrzeugen, Motorrädern und Fussgängern zurückging, ist sie bei Fahrrädern mit Elektromotor (darunter fallen auch viele Lastenräder), gestiegen. Wie viele der Unfälle allerdings konkret Lastenräder betreffen, geht aus der Statistik nicht explizit hervor (Ehrenfeuchter, 2020).	



Anbieter

ONO



ONO

- ONO bietet die Nutzung von E-Lastenrädern, bisher in Berlin, München und Leipzig, an
- Das Fahrzeug gilt nach eigenen Angaben rechtlich als Fahrrad, das Fahrzeug wird als emissionsfrei beschrieben
- Das Lastenrad verfügt über ein Ladevolumen von 2m3 mit einer Zuladung von 220kg
- Durch den in Sekundenschnelle durchführbaren Akkutauch wird die Reichweite als unbegrenzt angegeben
- Geschäftsmodell als umfassende Dienstleistung: Im monatlichen Festpreis von 690€ sind Vollkaskoversicherung, Wartung Verschleiss, Servicehotline und Zugang zu den Akkutauchautomaten inbegriffen

(Onomotion, o. D.)

Sortimo
Walter Rüeegg AG



Sortimo

- Das Unternehmen bietet das Lastenrad ProCargo CT1 an. Das Lastenrad ist für eine Zuladung von bis zu 140kg zuzüglich Fahrergewicht ausgelegt, die maximale Zuladung liegt bei 240kg
- Die Reichweite des batterieelektrisch unterstützten Fahrzeugs liegt je nach Fahrzeugkonfiguration bei 40-80km
- Das ProCargo CT1 L2 ist zu einem Kaufpreis von knapp 7000€ erhältlich
- Als Vorteile des Lastenrads werden Kostenersparnis durch geringere Wartungs- und Versicherungskosten und eine Zeitersparnis durch die Umgehung von Staus genannt

(Sortimo International, o. D.)



Pilotprojekte



Name des Projekts	ONO
Zeitraum des Projekts	2018-2019
Ziel des Projekts	Die Machbarkeit einer Umstellung von konventionellen Lieferfahrzeugen für die Logistikindustrie soll demonstriert werden. Mit den gewonnenen Erkenntnissen soll der Einstieg in die Serienproduktion erleichtert werden.
Projektpartner	ONO, Liefery, Hermes
Beschreibung	In dem Projekt geht es um die Erprobung der Prototypen von elektrischen Lastenrädern. Das Lastenrad hat ein Ladevolumen von zwei Kubikmetern. Vier Ladungen des Lastenrads sollen dabei einer Ladung eines gängigen Zustelltransporters entsprechen. Die ursprüngliche Zielgruppe des neuen E-Lastenrads war ursprünglich die KEP-Branche (Kurier-, Express-, Paketdienste). Ziel ist es aber, die gesamte City-Logistik zu adressieren. Die Vision des Anbieters ist, die E-Cargo-Bikes neben der Paketauslieferung auch für Waren wie Essen und Blumen bis hin zu Möbeln, Sperrgut und Abfällen einzusetzen (Reichel, 2019).
Ergebnisse	Viele innerstädtische Transporte lassen sich mit Lastenrädern erledigen: 2 von 3 Fahrten lassen sich mit Lastenrädern anstelle von Pkw oder leichten Nutzfahrzeugen durchführen. Neben den CO ₂ -Einsparungen nannten die Projektpartner weitere positive Vorteile: dazu gehören sowohl harte Aspekte wie das Wegfallen der Parkplatzsuche sowie weiche Aspekte wie Image und Gesundheit (Reichel, 2018).

Name des Projekts	Mir sattlä um
Zeitraum des Projekts	Juni bis November 2016
Ziel des Projekts	Ziel des Projekts war es, die Potenziale von Lastenvelos im Berner Wirtschaftsverkehr zu untersuchen
Projektpartner	Kooperation der Stadt Bern mit neun Betrieben
Beschreibung	In dem Versuch wurden verschiedenste Bereiche abgedeckt, darin der Transport von Lebensmitteln sowie die Belieferung von Kindertagesstätten, Handwerkern und Bäckern
Ergebnisse	Massgebend für die Ergebnisse des Projekts sind drei Thesen: Das erste ist das Substitutionspotenzial. Die These besagt, dass das Lastenrad aufgrund seiner Leistungsfähigkeit für betriebliche Fahrten im Stadtperimeter eine taugliche Alternative zum Auto darstellt. Die zweite These bezieht sich auf hemmende Faktoren für den Lastenrad-Einsatz. Hier wird ausgesagt, dass das Lastenrad in der Schweiz noch ein weitgehend unbekanntes Transportmittel ist und sich mit unterschiedlichen, subjektiven Vorbehalten konfrontiert sehen muss. Diese Vorbehalte können aber während des Einsatzes in der Projektphase abgebaut werden. Die dritte These sagt aus, dass der Lastenrad-Einsatz Anpassungen der Logistikprozesse notwendig macht. Im Rahmen des Projektes wurden erhebliche Umlagerungseffekte beobachtet: 77% der Fahrten, die vor dem Versuch mit einem fossil angetriebenem Fahrzeug durchgeführt wurden, konnten auf das Cargobike verlagert werden. Ein besonderer Vorteil der Cargobikes im Projekt war die Zeitersparnis durch kürzere Routen und das Wegfallen der Parkplatzsuche. Die maximale Zuladung, mit der ein sicheres und komfortables Fahren möglich war, lag bei 50-60kg, obwohl die theoretisch mögliche Zuladung bei 150kg liegt. Die von den Betrieben genannten grössten Probleme im Einsatz von Cargobikes waren die begrenzte Transportkapazität und Personalengpässe.

(Stadt Bern, 2017)



CO₂-Einsparpotenzial

Die Höhe der CO₂-Einsparungen, die erzielt werden, hängen von den Emissionen ab, die vor dem Umstellen auf Lastenräder ausgestossen wurden:

- Beispiel Projekt Royal Borough of Greenwich: In diesem Projekt übernahm ein E-Cargo-Bike 95% der lokalen Lieferungen mit einer Distanz von weniger als 5km. Die Emissionen fielen um 75%. Das E-Cargo-Bike, das über das Projekt eine Strecke von mehr als 200km zurücklegte, war für CO₂-Emissionen von weniger als 0,5kg verantwortlich, bei der Verwendung von Ökostrom hätten die Emissionen sogar bei 0 gelegen. Das entspricht jährlichen Einsparungen von mehr als 2000kg (Styles, 2018).
- Beispiel Projekt Dachser: Dieses Projekt zielt auf die emissionsfreie Belieferung der Stuttgarter Innenstadt ab. Dafür werden BEV-Lkw, die von Lastenrädern unterstützt werden, die mit maximal 250kg beladen werden können. Damit wird die gesamte Stuttgarter Innenstadt emissionsfrei beliefert. Die Gesamtemissionen für die Belieferung sinken allerdings nur um 23,35%, denn für den Hauptlauf sowie im Nahverkehr der korrespondierenden Dachser-Niederlassung werden weiterhin Diesel-Lkw eingesetzt (Abidi et al., 2021). Die hier genannten Einsparungen sind mit Vorsicht auf ein CO₂-Einsparungspotenzial von Lastenrädern zu übertragen, weil die Lieferkette umfassender betrachtet wird

Lastenräder können emissionsfrei liefern, die Einsparungen sind aber dennoch recht begrenzt, weil der Last-Mile-Verkehr für relativ wenige CO₂-Emissionen verantwortlich ist (vgl. 2000kg Einsparung mit Einsparungen durch Verwendung klimaneutraler Antriebstechnologien)

Betriebswirtschaftlicher Mehrwert

	Bezugsgrösse	Fahrrad	Lastenrad	Pkw
Anschaffungskosten in €	Einmalig	1000	0	0
Leasing-Anzahlung in €	Einmalig	0	1500	0
Leasing-Gebühr in €	Monatlich	0	100	300
Versicherung in €	Monatlich	0	10	80
Wartung in €	Monatlich	10	50	80
Ersatzteile in €	Monatlich	30	40	40
Verbrauchskosten in €	Je 100km	0	0,15	10,50

Tabelle 11: Kosten eines Lastenrads im Vergleich zu Fahrrad und Pkw

(Gruber, 2015)

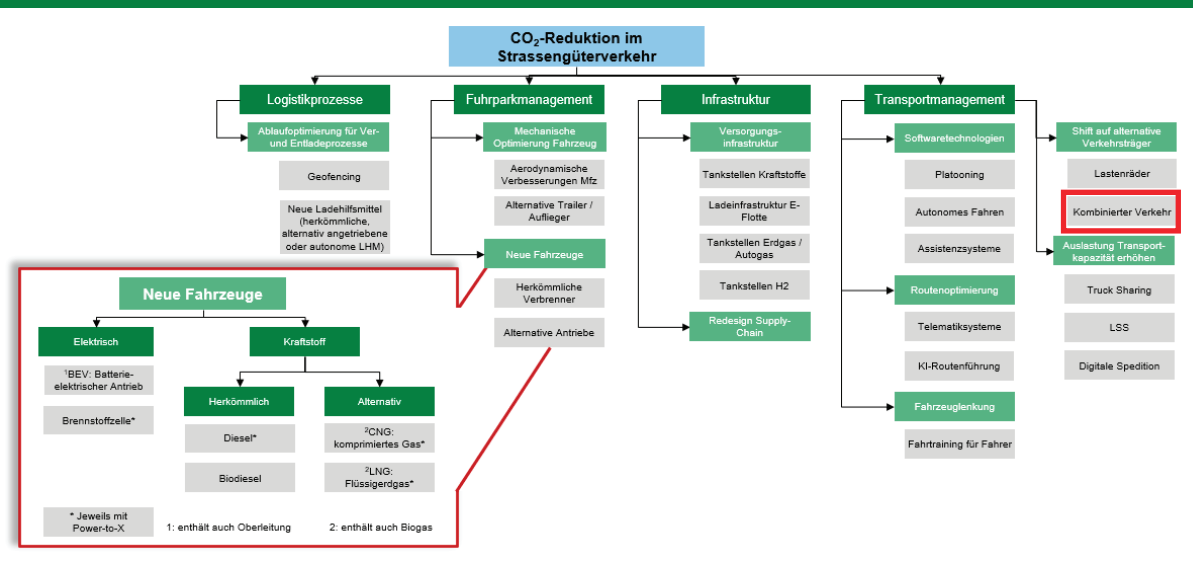
- Eine Untersuchung kam zu dem Ergebnis, dass sich mit Lastenrädern der höchste Umsatz pro km erzielen lässt: Der Umsatz für Fahrräder lag bei 1,82€/km, bei Pkw bei 1,45€/km, bei Lastenrädern hingegen bei 2,07€/km. Grundlage für dieses Berechnungsszenario ist die Tabelle der vorherigen Folie.
- Mit einem Online-Tool lassen sich die Kosten eines Lastenrads mit denen eines Sprinters vergleichen:

<https://lastenrad.vcd.org/nc/vorteile/kostenvorteil/calculator/>

Beispielrechnung des Online-Tools: verwendet man ein E-Lastenrad (Kaufpreis 7000€) anstelle eines VW Caddy bei einer Jahresfahrleistung von 10'000km, so spart man pro Jahr 3'444,17€ und pro Kilometer 1,28€

Kombinierter Verkehr

Verortung der Massnahme im Cluster



Definition

Als Kombinierte Verkehr wird der Gütertransport bezeichnet, an dem verschiedene Verkehrsträger beteiligt sind, ohne dass die transportierte Ware beim Wechsel ihr Transportgefäß verlässt. Beim Kombinierten Verkehr steigt also nicht das Transportgut, sondern der Transportbehälter um: Der Umstieg kann zwischen Lkw, Bahn und Schiff erfolgen. Beim Kombinierten Verkehr werden die Abschnitte Vor-, Haupt- und Nachlauf unterschieden. Der Hauptlauf stellt dabei allgemein den Hauptteil der Strecke dar. Er findet zwischen zwei Umschlagsterminals des Kombinierten Verkehrs statt. Der Vor- und Nachlauf umfasst hingegen die Teilstrecken zwischen Umschlagsterminal und Versand- bzw. Zielort. Damit Kombinierte Verkehr möglich ist, müssen standardisierte Ladeeinheiten verwendet werden. Diese standardisierten Ladeeinheiten sind vorwiegend Container, Wechselbehälter oder Sattelaufleger, es gibt aber auch den Fall der «Rollenden Landstrasse». Hier wird der gesamte Lkw verladen (Allianz pro Schiene, o. D.-b). In dieser Studie wird speziell der kombinierte Verkehr mit den beiden Verkehrsträgern Strasse und Schiene (von Lkw auf Bahn) betrachtet.

Funktionsweise

Beim Kombinierten Verkehr aus Bahn und Lkw kommt für den Hauptlauf die Bahn, im Vor- und Nachlauf der Lkw zum Einsatz. Die Umschlagsterminals verfügen in der Regel über Krananlagen (oder mobile Reach Stacker (Staplerberater, o. D.)), mit deren Hilfe die Ladeeinheiten vom Lkw auf den Zug wechseln. Eine weitere Alternative zu Krananlagen sind Horizontalumschlagsysteme wie CargoBeamer (spezielle Waggon, mit denen ein sofortiger Umstieg von Lkw auf Schiene möglich ist) (CargoBeamer, o. D.).



Marktreife

Verbreitungsgrad

Erste Ideen und Visionen

Vollständige kommerzielle Implementierung

Niedrig

Hoch



Beim Kombinierten Verkehr handelt es sich um ein logistisches Konzept und keine neue Technologie, deswegen kann die Marktreife als sehr hoch angesehen werden. Wichtige technologische Voraussetzungen sind gegeben. So ist eine wichtige Voraussetzung für den Kombinierten Verkehr, nämlich die Verwendung von normierten Transporteinheiten, gegeben (Container, Wechselbrücken und Sattelaufleger). Auch die Technologie zum Aufladen (Kräne, Reach-Stacker) ist vorhanden. Ein Problem kann aber die begrenzte Verfügbarkeit von Umschlagterminals sein. In Deutschland gibt es (Stand 2018) 219 Terminals (Studiengesellschaft für den Kombinierten Verkehr, o. D.). Der kombinierte Verkehr wird stark ausgebaut: Zwischen 2019 und 2029 soll der Kombinierte Verkehr in Europa jährlich um gut 4% wachsen (VerkehrsRundschau, 2020).

Der Kombinierte Verkehr hat einen grossen Anteil an der Verkehrsleistung auf der Schiene. Im Jahr 2015 betrug die Verkehrsleistung auf der Schiene 45,5 Mrd. tkm, was einem Anteil von 40% am gesamten Schienengüterverkehr entspricht (Allianz pro Schiene, o. D.-b). Nimmt man allerdings den gesamten Güterverkehr als Massstab, so kommt man auf einen Anteil des kombinierten Verkehrs aus Bahn und Lkw von nicht einmal 2% (Studiengesellschaft für den Kombinierten Verkehr, 2019)

SWOT-Analyse

Stärken

- Es können die Stärken beider eingesetzter Technologien kombiniert werden (Kostenvorteile, Energieeffizienz und Klimafreundlichkeit der Bahn mit Flexibilität von Lkw (Allianz pro Schiene, o. D.-b))
- Verlader, die keinen Zugang zur Schiene haben, können mithilfe von kombiniertem Verkehr dennoch die Vorteile der Schiene nutzen (Allianz pro Schiene, o. D.-b), während der Strassengüterverkehr mit Emissionen von durchschnittlich 103g/tkm verbunden ist, werden beim Transport per Bahn gerade einmal 19g/tkm ausgestossen.
- Es gibt eine Vielzahl an gesetzlichen Vorteilen (Deutschland): erhöhtes Maximalgewicht von 44t (anstelle der sonst zulässigen 40t), Befreiung von der Kfz-Steuer, Ausnahmen bei Fahrverboten, Förderungen für den Neu- und Ausbau von Umschlagterminals bei nicht bundeseigenen Unternehmen (Studiengesellschaft für den Kombinierten Verkehr, 2019)

Schwächen

- Mangel an Umschlagterminals: Wenn zum Erreichen des Terminals vom Versandort aus quer oder gar entgegen der eigentlichen Fahrtrichtung gefahren werden muss, erhöht sich die zurückgelegte Strecke deutlich. Dies geht mit erheblichen Einbussen für die ökologische Effizienz des kombinierten Verkehrs einher (IFEU & SGKV, 2002).
- Je höher die Auslastung eines Zugs, desto grösser die Umweltfreundlichkeit. Eine hundertprozentige Auslastung ist jedoch nicht möglich. Deshalb ist das Einsparungspotenzial stark begrenzt (IFEU & SGKV, 2002).

Chancen

- Durch den Einsatz von standardisierten Ladeeinheiten (wie Containern) wird die Bündelung unterschiedlicher Güterverkehre möglich (Allianz pro Schiene, o. D.-b)
- Die Emissionen beim Schienentransport hängen von den Emissionen der Stromerzeugung ab (IFEU & SGKV, 2002). Wenn der Strommix langfristig emissionsärmer wird, so sinken auch die Emissionen des kombinierten Verkehrs nachhaltig
- Der Marktanteil des kombinierten Verkehrs lässt sich steigern, indem Technologien entwickelt werden, mit denen bisher nicht kranbare Trailer umgeladen werden können.

Risiken

- Eine Studie, die zum Ergebnis kommt, dass der kombinierte Verkehr nicht notwendigerweise mit Einsparungen einhergeht, nimmt Verbrauchswerte von bis zu 39Liter Diesel pro 100km an (IFEU & SGKV, 2002). Tatsächlich sind aber Dieselmotoren jetzt schon effizienter in ihrem Verbrauch. Die Verbesserung der Effizienz von Dieselmotoren wird also den Kombinierten Verkehr zunehmend schlechter gegenüber dem reinen Strassengüterverkehr aussehen lassen, weil die relativen Einsparungen geringer sind.
- Alternative Antriebe können den Strassengüterverkehr umweltfreundlich gestalten und damit die Umweltvorteile des kombinierten Verkehrs substituieren

- Die Kapazität der Schieneninfrastruktur befindet sich bereits heute an der Belastungsgrenze (Allianz pro Schiene, o. D.-a). Deswegen lässt sich der kombinierte Verkehr nicht ohne weiteres skalieren.

Anbieter



Hupac

- Das Schweizer Unternehmen ist weltweit aktiv im Kombinierten Verkehr, ein besonderer Schwerpunkt liegt im transalpinen Verkehr
- Mit 150 Zügen werden die grossen europäischen Wirtschaftsräume verbunden, das Verkehrsnetz geht aber auch bis nach Russland in den fernen Osten (Hupac Intermodal, o. D.-b)
- Eine Wirtschaftlichkeit des Kombinierten Verkehrs kann es schon ab einer Transportdistanz von 300km geben (Hupac Intermodal, o. D.-c)
- Der Kombinierte Verkehr wächst jährlich um 7,7%, Hupac konnte im Jahr 2018 sogar seinen Umsatz um 19,4% steigern (Hupac Intermodal, o. D.-d)
- Die Neue Eisenbahn-Alpentransversale (NEAT) ist eine grosse Chance für den kombinierten Verkehr (Hupac Intermodal, o. D.-a) und besonders für Hupac, weil einer der Schwerpunkte des Unternehmens der Alpentransitverkehr ist (Hupac Intermodal, o. D.-b)



Lkw Walter

- Das österreichische Unternehmen ist schwerpunktmässig in Europa sowohl auf der Schiene als auch per Schiff tätig und verbindet damit alle wichtigen Wirtschaftszentren Europas (Lkw Walter Internationale Transportorganisation, o. D.-a)
- Es werden in der Flotte mehr als 10'000 kranbare Auflieger verwendet (Lkw Walter Internationale Transportorganisation, o. D.-b), die Sattelaufleger lassen sich also mithilfe von Kränen von auf die Waggons laden
- Alle Trailer sind ausserdem mit Telematiksystemen ausgerüstet (Lkw Walter Internationale Transportorganisation, o. D.-b)



Pilotprojekte



Name des Projekts	ERFA KV
Dauer des Projekts	2017 - 2019
Ziel des Projekts	Das Ziel des Projekts ist die Steigerung des Anteils des Schienengüterverkehrs am gesamten Güterverkehr und damit einen Beitrag zum Erreichen der Klimaziele zu erreichen
Projektpartner	Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML, Studiengesellschaft für den kombinierten Verkehr
Beschreibung	Der Verbreitung des Kombinierten Verkehrs sind einige Hemmnisse entgegengesetzt. Der Kombinierte Verkehr setzt die Kenntnis der einzelnen Akteure über die Einsatzmöglichkeiten der einzelnen Verkehrsträger voraus. Es fehlt ausserdem ein Austausch von Lkw-Speditionen und Verladern, bei dem gemeinsame Herausforderungen analysiert und gemeinsam Bedarfe mit anderen Akteuren kommuniziert werden. Bei diesen Problemen greift das Projekt «ERFA KV» ein. In sechs Regionen (Dortmund, Frankfurt a.M., Regensburg/Nürnberg, Lausitz, Hamburg und Osnabrück) fanden zweimal jährlich je Region Erfahrungsaustausche zum kombinierten Verkehr mit Akteuren der Transportkette statt.
Ergebnisse	Der Kombinierte Verkehr ist die richtige Antwort auf mehrere aktuelle Trends, darin Klimaschutz, Digitalisierung, Fachkräftemangel und Kapazitätssteigerung. Die Verringerung der CO ₂ -Emissionen steht im Fokus vieler politischer Agenden. Der kombinierte Verkehr kann weniger CO ₂ -Emissionen verursachen als der reine Strassengüterverkehr. Da Klimaschutz ein Thema ist, das besonders junge Leute bewegt, kann der Kombinierte Verkehr neue Arbeitskräfte anziehen, ein Aspekt, der insbesondere wichtig ist, da die gesamte Logistikbranche mit einem Mangel an Nachwuchskräften zu kämpfen hat. Als Ergebnis des Projekts werden ausserdem Rahmenbedingungen genannt, unter denen der kombinierte Verkehr besonders geeignet ist. Ab 300km ist es sinnvoll, über Kombinierten Verkehr nachzudenken. Das Umschlagterminal sollte nicht weiter als 30km entfernt sein, es sei denn, die Gesamtstrecke des kombinierten Verkehrs ist sehr gross.

(Klukas et al., 2019)

CO₂-Einsparpotenzial

Einsparungseffekte

- Der Bahnverkehr hat einen geringeren Energieverbrauch pro tkm
- Im Bahnverkehr kann ein Strommix verwendet werden, der sich CO₂-armen Energiequellen (erneuerbar, Atomstrom) bedient (IFEU & SGKV, 2002).
- Lkw im kombinierten Verkehr dürfen eine Nutzlast von bis zu 44t haben. Dies wirkt sich positiv auf die CO₂-Emissionen pro tkm aus (Klukas et al., 2019).

Zusätzliche Emissionen

- Die Gesamtstrecke des Kombinierten Verkehrs besteht aus Vor-, Haupt- und Nachlauf. Damit ist die zurückgelegte Strecke grösser und die CO₂-Emissionen steigen. Befindet sich das Umschlagterminal vom Versandort im Extremfall in entgegengesetzter Richtung zum Zielort, so steigt die Gesamtstrecke besonders stark an
- Wenn die Kapazität der Züge nicht ausgelastet ist, ist der Kombinierte Verkehr weniger sinnvoll (IFEU & SGKV, 2002).

Eine pauschale Aussage, ob der kombinierte Verkehr emissionsärmer als der reine Strassengüterverkehr ist, lässt sich nicht treffen. Die entscheidenden Faktoren für eine gute CO₂-Bilanz des Kombinierten Verkehrs sind:

- Der Vor- und Nachlauf des kombinierten Verkehrs inkl. Umschlagsterminals sind günstig gelegen
- Lange Züge mit einer hohen Kapazitätsauslastung
- Emissionsarme Stromproduktion (IFEU & SGKV, 2002).

Die Auswertung der CO₂-Emissionen im Kombinierten Verkehr ergab (IFEU & SGKV, 2002):

- In 2 Fällen 3% höhere Emissionen (Zugverkehr durch Tschechien mit schmutzigem Strom)
- In 4 Fällen 20% geringere Emissionen
- In 7 Fällen 20-50% geringere Emissionen
- In 6 Fällen um mehr als 50% geringer (Zugverkehr durch Frankreich mit viel Atomstrom und damit sehr geringen CO₂-Emissionen)

Auch wenn die Studie aussagte, dass man dem kombinierten Verkehr geringere CO₂-Emissionen zusprechen kann, so erkennt man hier doch einen klaren Trend von geringeren Emissionen

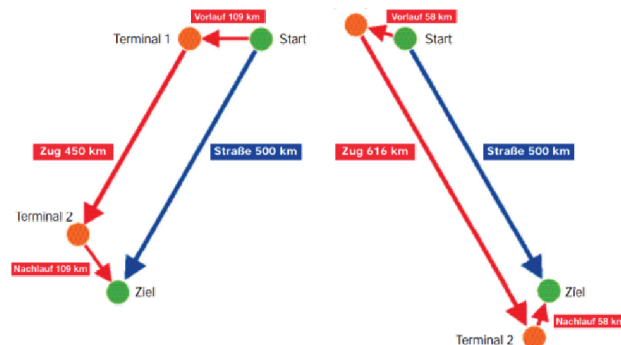


Abbildung 43: Anschauliche Auswirkungen der Lage der Umschlagsterminals auf die Gesamtstrecke des kombinierten Verkehrs (IFEU & SGKV, 2002)



Betriebswirtschaftlicher Mehrwert

Gesetzliche Kostenvorteile:

- Befreiung von Kfz-Steuer
- Geringere Mautkosten
- Ausnahmen bei Fahrverboten
- Förderung mit Bundesmitteln (Klukas et al., 2019)

Betriebswirtschaftliche Kostenvorteile:

- Kosten für Bahn sind geringer als für Lkw: für einen Lkw Kosten von 0,94 €/km und Container, Zug 17-21,50€/km (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2021), für die Annahme, dass ein Zug 52 Lkw ersetzt (Allianz pro Schiene, 2016), sind das 0,41€/km

Kostennachteile:

- Höhere Kosten durch Umwege zu den Umschlagterminals
- Kosten durch das Umschlagen am Terminal zwischen 30-70€ (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2021)

Strassengüterverkehr

500km mit Lkw

→ $500\text{km} \cdot 0,94\text{€/km} = 470\text{€}$

Kombinierter Verkehr

218km mit Lkw

450km mit Bahn

Zweimal umschlagen

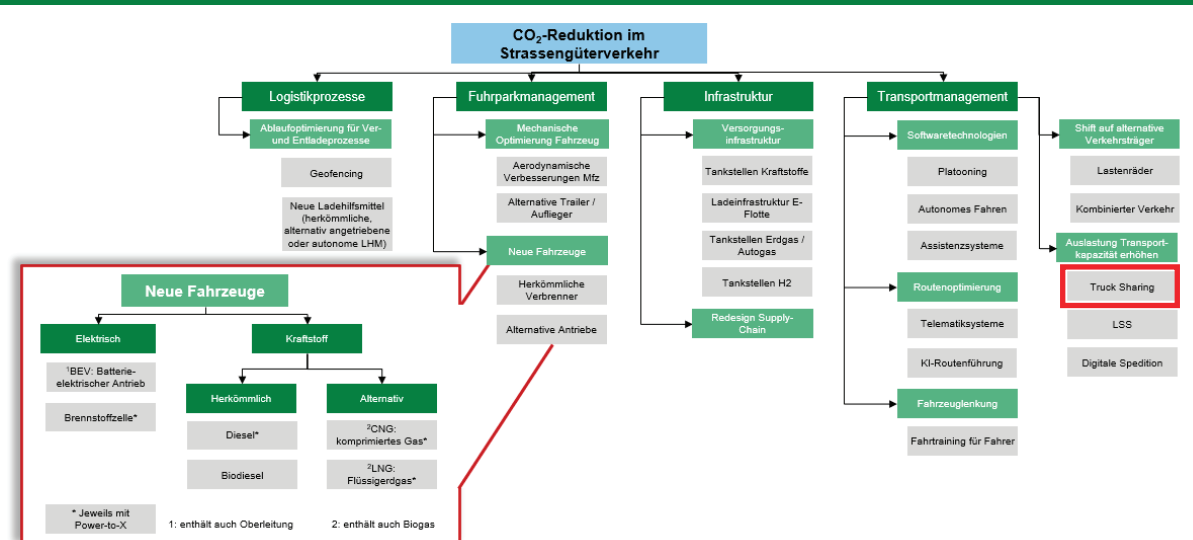
→ $218\text{km} \cdot 0,94\text{€/km} + 450\text{km} \cdot 0,41\text{€/km} + 2 \cdot 50\text{€} = 489\text{€}$

Für dieses Beispiel ist der Kombinierte Verkehr teurer. Es lässt sich pauschal nicht sagen, wann der kombinierte Verkehr finanziell vorteilhaft ist. Eine Faustregel besagt, dass es sich ab 300km lohnen kann, über kombinierten Verkehr nachzudenken (Allianz pro Schiene, 2016)

11.3.4.5 Auslastung Transportkapazität erhöhen

Truck Sharing

Verortung der Massnahme im Cluster



Definition

Das Truck Sharing bietet die Möglichkeit unausgelastete Trucks (d.h. vollständig ungenutzte Lkws in Form von ziehenden und gezogenen Einheiten) die sich in der Dispositionshoheit eines (oder mehreren) Flottenbetriebern befinden mit weiteren Logistikdienstleistern innerhalb einer Gemeinschaft gegen eine Bereitstellungs- und Nutzungsgebühr zwischenzeitlich (wenigen Stunden bis mehrere Tage) zu teilen (Wildhaber, 2019).

Funktionsweise

Hat beispielsweise ein Logistikdienstleister ungenutzte Ressourcen, kann er diese über eine digitale Plattform (als many-to-many Plattform ausgestaltet) einem anderen Flottenbetreiber zur Verfügung stellen, welcher seine Aufträge mit den ihm zur Verfügung stehenden Ressourcen nicht bewältigen kann (Wildhaber, 2019).

Somit könne die Ressourcen stärker ausgelastet werden, was zu einer Effizienzsteigerung und einer Emissionsreduktion führt (Wildhaber, 2019).

Marktreife

Erste Ideen und Visionen

Vollständige kommerzielle Implementierung



Zum Konzept des «Truck Sharing» sind erste Ideen vorhanden. Um diese Vision umzusetzen muss bei den Logistikdienstleistern ein Paradigmen-Wandel des Mindsets hin zur geteilten Nutzung der Lkws gepaart mit dem Einsatz fremdgebrandeter Fahrzeuge stattfinden.

Verbreitungsgrad

Niedrig

Hoch



Der Verbreitungsgrad «Truck Sharing»-Konzepts ist gering, da es sich noch um eine Vision handelt.

SWOT-Analyse

Stärken

- Durch den Verzicht sich die Ressource selbst anzuschaffen und stattdessen ungenutzte Ressourcen zu verwenden, werden weniger Rohstoffen verbraucht, Emissionen reduziert und die Auslastung der Lkws gesteigert (Wildhaber, 2019).
- Durch das Teilen von Ressourcen können kurzfristige Über-/Unterkapazitäten ausgeglichen werden, was Potenzial zur Kostensenkung und zu höheren Margen bietet (Wildhaber, 2019).
- Das «Laderaum-Sendungs-Sharing» kann zu einer Reduktion von Staus führen (Wildhaber, 2019).

Schwächen

- Damit der Mehrwert des «Truck Sharing» gewährleistet ist, muss eine möglichst grosse Community aufgebaut werden, d.h. Flottenoperateure, welche eine räumliche, ressourcen- und branchentechnische Kompatibilität aufweisen.
- Für die Umsetzung des «Truck Sharing» braucht es umfangreiche Rahmenbedingungen, welche die Ausgestaltung der digitalen Plattform, des Geschäftsmodells und der Governance regelt.

Chancen

- Durch die Zusammenarbeit kann der Zusammenhalt der Branche gestärkt werden.
- Schneller, effizienter Zugang zu Ressourcen (bspw. Lkws)
- Erhöhte Flexibilität beim Einsatz der Ressourcen
- Geringere Kosten durch höhere Ressourcen-Auslastung (u.a. Reduktion der Fixkosten pro Lkw-Kilometer und benötigten Flotte) (Wildhaber, 2019).

Risiken

- Durch den unsachgemässen Umgang mit den geteilten Ressourcen (bspw. Beschädigungen) kann es zu einem Vertrauensverlust kommen, was die Zusammenarbeit gefährdet.



Anbieter

Das «Truck Sharing» ist zurzeit erst eine Vision. Jedoch sind Plattformen vorhanden, welche auf einem ähnlichen Konzept beruhen.

Pilotprojekte

Das Truck Sharing ist teilweise erforscht und könnte als nächsten Schritt in die Entwicklung im Sinne eines praxisnahen Forschungs- und Entwicklungs-Projekts übergehen.

CO₂-Einsparpotenzial

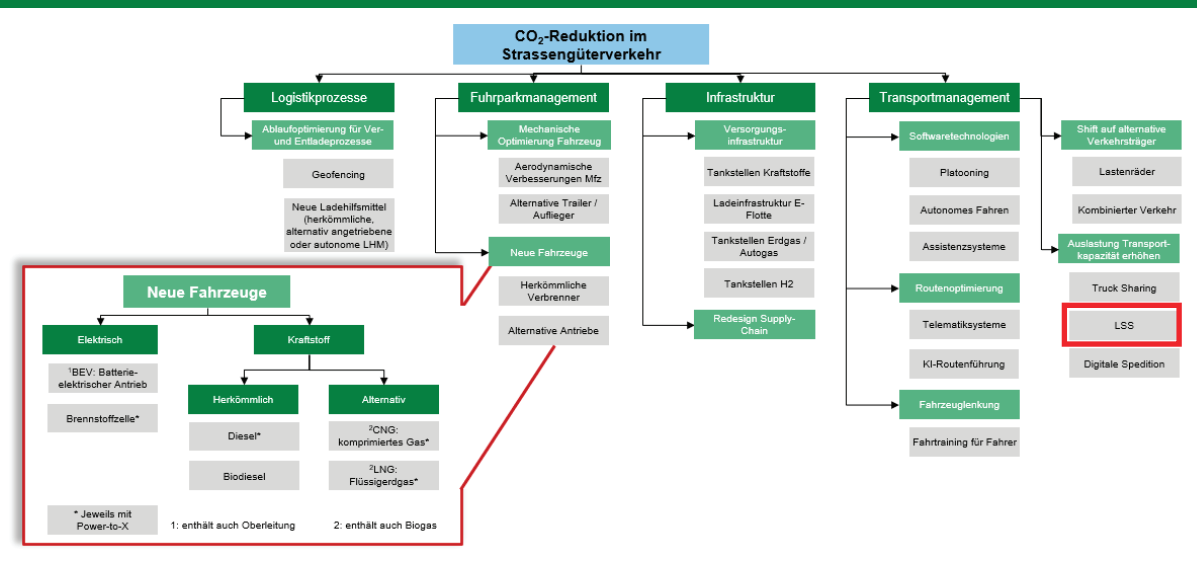
Ökologisch kann das «Truck Sharing»-Konzept zu einem nachhaltigeren Straßengüterverkehr beitragen, indem darauf verzichtet wird Ressourcen anzuschaffen und stattdessen ungenutzte Ressourcen genutzt werden. Dies reduziert Bedarf an Rohstoffen und führt zu weniger Emissionen (Wildhaber, 2019). Da es noch keine detaillierten Studien zum CO₂-Einsparpotential des «Truck Sharing» gibt, kann dazu momentan noch keine Aussage getroffen werden.

Betriebswirtschaftlicher Mehrwert

Ökonomisch kann das «Truck Sharing»-Konzept dazu beitragen höhere Lkw-Auslastungen im Sinne von weniger Standzeiten zu erreichen, was zu einer Effizienzsteigerung führt (Wildhaber, 2019). Da die Mehrwerte des «Truck Sharing»-Konzepts momentan noch nicht tiefer erforscht sind, bedürfen sie einer eingehenden Potentialanalyse.

Laderaum-Sendungs-Sharing

Verortung der Massnahme im Cluster



Definition

Das Laderaum-Sendungs-Sharing bietet neben der gemeinsamen Abwicklung von Sendungen die Möglichkeit, ungenutzte Laderäume die unter Dispositionshoheit von Flottenbetreibern stehen über eine (digitale) Plattform weiteren Flottenbetreibern innerhalb der Gemeinschaft zugänglich zu machen, um eine höhere Auslastung zu erreichen und dadurch die Nachhaltigkeit (ökonomisch und ökologisch) zu fördern (Wildhaber, 2020).

Funktionsweise

Transparenz als Basis: Flottenübergreifende Sichtbarkeit von verfügbaren Laderäumen

Koordination zur Hebung des Netzwerkeffekts: eine Prozedur zum Teilen, Matchen (Algorithmus), Zuordnen & Abwicklung der Sharing-Situation

Digitale Plattform als digitale Unterstützung des Sharingkonzepts: Systemarchitektur & Funktionen geben den Rahmen für die Interaktion zwischen den Flottenbetreibern & Teilen von überhängen

Weitere Konzeptelemente wie Contribution Management, Governance werden benötigt, um das Sharing-Konzept umzusetzen

(Wildhaber, 2021)

Marktreife

Erste Ideen und Visionen

Vollständige kommerzielle Implementierung

Das Konzept des «Laderaum-Sendungs-Sharing» befindet sich in der Pilotierung. Momentan werden verschiedene Konzeptelemente ausgearbeitet, welche sich schlussendlich im Geschäftsmodell wiederfinden werden. Zudem wurde eine Potentialanalyse erstellt, bei welcher erste Effekte des «Laderaum-Sendungs-Sharing» identifiziert werden konnten. Die Schattenrechnung zeigte für ein Konsortium innovativer Schweizer Unternehmen im Herbst 2020, dass eine Auslastungssteigerung von bis zu 20% möglich ist (Nallinger, 2021). Dieses Potenzial variiert je nach Zeitraum und Region. Zudem ist es von der Grösse des Konsortiums abhängig, denn je mehr Flottenbetreiber am Laderaum-Sendungs-Sharing teilnehmen, desto höher ist auch das Auslastungssteigerungs-Potential.

Verbreitungsgrad

Niedrig

Hoch

Der Verbreitungsgrad «Laderaum-Sendungs-Sharing»-Konzept ist gering, da es sich noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium befindet. Jedoch gibt es zwei Stückgutkooperationen, welche sich mit der Pilotierung auseinandersetzen.

SWOT-Analyse

Stärken

- Das «Laderaum-Sendungs-Sharing» ermöglicht eine höhere Auslastung, wodurch die Kosten gesenkt und höhere Margen erreicht werden können (Wildhaber, 2020).
- Das «Laderaum-Sendungs-Sharing» ermöglicht durch den Wegfall von unausgelasteten Fahrzeugen eine Reduktion der Emissionen und des ökologischen Fussabdruckes (Wildhaber, 2020).
- Das «Laderaum-Sendungs-Sharing» kann zu einer Reduktion von Staus führen.

Schwächen

- Damit der Mehrwert des «Laderaum-Sendungs-Sharing» gewährleistet ist, muss eine möglichst grosse Community aufgebaut werden, d.h. bestehend aus Flottenbetreibern, welche räumlich und sendungstechnisch kompatibel sind.
- Für die Umsetzung des «Laderaum-Sendungs-Sharing» braucht es umfangreiche Rahmenbedingungen, welche die Ausgestaltung der digitalen Plattform, des Geschäftsmodells und der Governance regelt (Wildhaber, 2020).

Chancen

- Die Kooperationspartner könnten durch das aufgebaute Vertrauen auch über die Community hinaus zusammenarbeiten.
- Durch Zusatzdienstleistungen könnte ein Ökosystem aufgebaut werden.
- Durch die Zusammenarbeit kann der Zusammenhalt der Branche gestärkt werden.

Risiken

- Durch Datenklau oder durch unsachgemässen Umgang mit den Sendungen eines Partners kann es zu einem Vertrauensverlust kommen, was die Zusammenarbeit gefährdet.
- Durch harte Restriktionen (bspw. Zeit, Sendungsgrösse, Ort) wird die Matchingrate erheblich eingeschränkt, was den Erfolg der Plattform gefährdet.



Anbieter

Da sich das «Laderaum-Sendungs-Sharing» in der Pilotierung befindet sind momentan noch keine Anbieter vorhanden.

Pilotprojekte



Name des Projekts	«Laderaum-Sendungs-Sharing»
Dauer des Projekts	05/2020 – 04/2022
Projektvolumen	500 kCHF gefördert von Innosuisse und Praxispartnern
Projektpartner	Hauptumsetzungspartner: Cargo24 Beteiligte Logistiker: BDK Informatik AG, Hasler Transport AG, Krummen Kerzers AG, Lagerhäuser Aarau AG, TRAVECO Transporte AG, Zibatra Logistik AG Wissenschaftliche Begleitung: Institut für Supply Chain Management der Universität St.Gallen
Ziel des Projekts	Ausarbeitung nachfolgender Bausteine: Methodik und Transparenz Koordination inkl. Sharing-Potentiale Geschäftsmodell inkl. Vergütungsmodell Governance inkl. Community-Eintritt, Nutzungsregeln und Incentivierung Digitale Plattform inkl. Schnittstellen, Transparenz- und Matching-Services Implementierung des Laderaum-Sendungs-Sharing und Weiterentwicklungsmöglichkeiten (insb. Truck Sharing)

(Nallinger, 2021)

CO₂-Einsparpotenzial

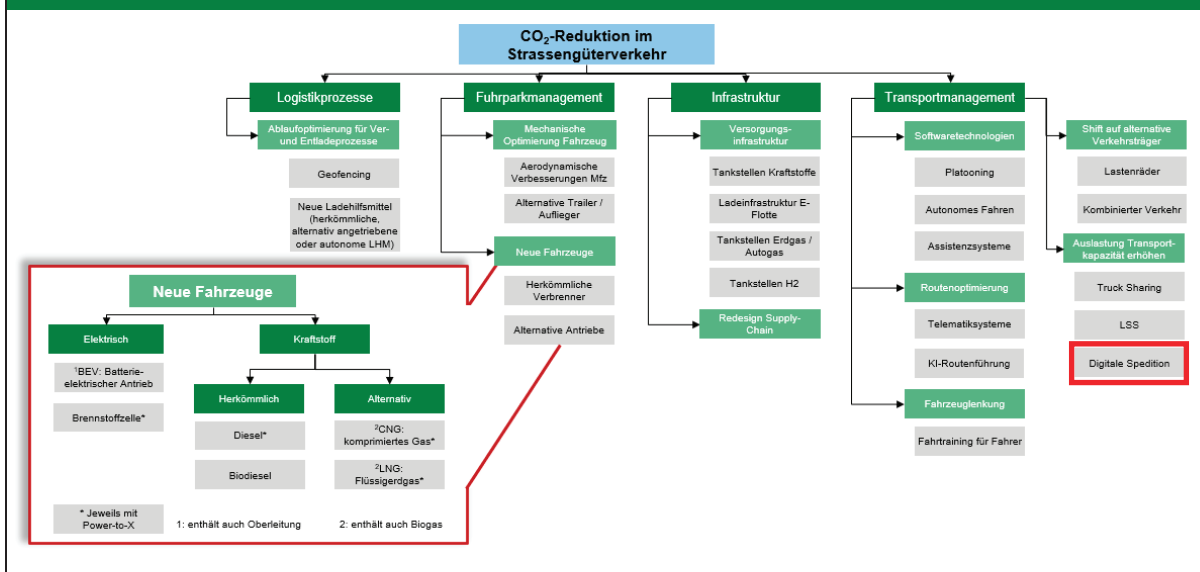
Das «Laderaum-Sendungs-Sharing» trägt zu einer höheren Laderaumauslastung und weniger Leerfahrten für die beteiligten Flottenbetreiber bei (Wildhaber, 2020). Dies hat zur Folge, dass für die gleiche Transportleistung weniger Fahrzeugkilometer gefahren und somit weniger Lkws benötigt werden. Dadurch werden einerseits weniger Ressourcen für den Bau und die Verschrottung von LKWs benötigt. Andererseits sind weniger Lkw auf der Straße unterwegs, was weniger Staus verursacht. All das hat einen positiven Effekt auf den CO₂-Ausstoss. Während der Straßengüterverkehr in der Schweiz mehr als 4 Millionen Tonnen CO₂ p.a. durch konventionelle Transportkonzepte verursacht, wird durch das LSS-Konzept eine Reduktion der CO₂-Emissionen bei den Umsetzungspartner um 10 bis 15% erwartet.

Betriebswirtschaftlicher Mehrwert

Durch das «Laderaum-Sendungs-Sharing» werden für die gleiche Menge an Sendungen weniger Fahrzeugkilometer gefahren und somit weniger Lkws benötigt. Durch dies sind Kosteneinsparungen von 10-15% zu erwarten, wodurch die Umsatzmarge um etwa 0,5% oder mehr erhöht wird (Wildhaber, 2020).

Digitale Spedition

Verortung der Massnahme im Cluster



Definition

Digitale Speditionen kombinieren Planung und Koordination des Gütertransports, ohne physische Ressourcen (u.a. Lkws) zu besitzen. Logistikdienstleister und Sendungen werden so aufeinander abgestimmt, dass die Auslastung der Lkws optimiert und Leerfahrten reduziert werden. Darüber hinaus findet bei der Anfrage zum Transport einer Sendung in der Regel eine dynamische Preisfindung statt (Kille et al., 2018, S. A48). Gegen aussen tritt die digitale Spedition dabei als vollwertiger Spediteur auf, welche sämtliche Verantwortlichkeiten und Haftungen übernimmt. (Kille et al., 2018; Seeßle, 2019).

Funktionsweise

Durch digitale Tools (bspw. Telematikdaten, künstliche Intelligenz) werden Bündelungspotentiale und Preise von digitqalen Speditionen automatisch ermittelt (Seeßle, 2019).

Im Leistungserstellungsprozess werden von digitale Speditionen persönliche Beratungen sowie individualisierte Mehrwertdienstleistungen angeboten (Seeßle, 2019).



Marktreife		Verbreitungsgrad	
Erste Ideen und Visionen	Vollständige kommerzielle Implementierung	Niedrig	Hoch
			
Digitale Speditionen haben sich mittlerweile in der Logistikbranche etabliert und weisen eine hohe Verfügbarkeit sowie einen hohen technologischen Entwicklungsstand auf (Kille et al., 2018). Aufgrund der Tatsache, dass verschiedene Unternehmen dieses Geschäftsmodell am Markt erfolgreich einsetzen, kann von einer vollständigen kommerziellen Implementierung ausgegangen werden.		Die am Markt agierenden Unternehmen decken verschiedene Verkehrsträger und Regionen ab, (Seeßle 2019) wodurch das Geschäftsmodell einen hohen Diffusionsgrad aufweist.	
SWOT-Analyse			
Stärken		Chancen	
• Verlader erhalten über eine digitale Schnittstelle Zugriff auf geprüfte Transportkapazitäten (Kille et al., 2018) • Hohe Transparenz entlang der Wertschöpfungskette durch «Track & Trace» (Kille et al., 2018) • Administrative Aufwände können durch die Automatisierung reduziert werden (Kille et al., 2018) • Logistikdienstleister profitieren von einer digitalen Schnittstelle zum Kunden (Kille et al., 2018) • Alle Informationen sind zentralisiert, wodurch die Zusammenarbeit effizienter wird (Kille et al., 2018) • Schlankere Abwicklungsprozesse ermöglichen ein niedrigeres Kostenniveau (Kille et al., 2018)		• Die Automatisierung erleichtert die Zusammenarbeit mit kleineren Partnern und die Bearbeitung kleinerer Aufträge (Kille et al., 2018)	
Schwächen		Risiken	
• Den Verlader kann die bereitgestellte Transport-(Kosten-)Effizienz aufgrund mangelnder Sendungsdichte nicht immer gewährleistet werden (Kille et al., 2018) • Den Logistikdienstleistern kann nicht garantiert werden, dass sie stetig Sendungen über die digitale Spedition erhalten (Kille et al., 2018) • Häufig beschränkt sich das Leistungsspektrum der digitalen Speditionen auf Standardtransporte (bspw. Spotmarkt im Stückgutbereich) (Kille et al., 2018) • Die digitale Spedition muss eine kritische Größe erreichen, um Verlader und Logistikdienstleister erfolgreich zu verbinden (Kille et al., 2018)		• Die Datensicherheit und Echtzeitübertragung von Informationen muss sichergestellt werden (Kille et al., 2018) • Durch die Analyse des Nutzungsverhaltens besteht die Gefahr einer individualisierten Preisgestaltung (Seeßle, 2019) • Die Konzentration auf eine oder wenige Plattformen innerhalb der Branche könnte zu einem Lock-In-Effekt und zu einer Abhängigkeit der Nachfrager und Anbieter führen (Seeßle, 2019)	

Anbieter



InstaFreight

- InstaFreight bietet ihren Kunden digitale Transportdienstleistungen, welche eine zuverlässigere und einfachere Abwicklung der Gütertransporte ermöglicht (InstaFreight, o. D.).
- Das 2016 gegründete Unternehmen nutzt digitale Technologien zur Prozessoptimierung und zur transparenteren Informationsweitergabe im Strassengüterverkehr. Damit werden bislang vor allem analog gestaltete Prozesse im Bereich Buchung und Transporte ins digitale Zeitalter überführt (Behn, 2020).
- Nach eigenen Angaben werden durch InstaFreight 500 t CO₂ pro Jahr eingespart (InstaFreight, o. D.).



Cargonexx

- Das 2016 gegründete Unternehmen Cargonexx will die Zusammenarbeit zwischen Frachtführern und Auftraggebern effizienter, fairer und transparenter gestalten (Cargonexx, o. D.).
- Auf Basis von statistischen Big Data-Algorithmen und machine learning findet Cargonexx für jeden Auftrag den richtigen Preis und den richtigen LKW (Schickler Unternehmensberatung, 2015).
- Mit ihrem Geschäftsmodell möchte das Start-up bis ins Jahr 2023 dabei helfen 45'000 Tonnen CO₂-Emissionen einzusparen (Dispo, 2018).



Carrypicker

- Das Hamburger Startup Unternehmen Carrypicker hat sich auf die profitable Bündelung von Teilladungen spezialisiert. In Bruchteilen von Sekunden errechnet das 2017 gegründete Unternehmen auf Basis einer künstlichen Intelligenz die jeweils beste Lösung für die Disposition des Transportguts (Carrypicker, o. D.).
- Durch die bessere Ausgelastung der Lkws und die intelligente Vernetzung der Transportwege, ist eine erhebliche Effizienzsteigerung möglich, wodurch der CO₂-Ausstoss gesenkt werden kann (Carrypicker, o. D.).



Sennder

- Sennder ist ein führender digitaler Strassenspediteur in Europa, welcher Verladern Zugang zu einer vernetzten Flotte von Tausenden von Lkws bietet (Sennder, o. D.).
- Das Berliner Start-up Unternehmen konzentriert sich auf die Digitalisierung und Automatisierung aller Strassenlogistikprozesse (Sennder, o. D.).
- Durch den Einsatz von firmeneigener Technologie kann Sennder die Unwirtschaftlichkeit im Versandprozess reduzieren und senkt somit Kosten für Verlader, erhöht die Einnahmen für Spediteure und reduziert CO₂-Emissionen im gesamten Logistiksektor (Loginfo24, 2020).



CO₂-Einsparpotenzial

Durch digitale Speditionen können die Laderäume besser ausgelastet werden, indem Transporteure und die zu überbringende Fracht so miteinander verbunden werden, dass die Nachfrageströme optimiert werden können (Kille et al., 2018). Durch diese Optimierung werden Leerfahrten vermieden, Extrafahrten eingespart, Ineffizienzen verringert und somit die Umwelt geschont (Seeßle, 2019).

Betriebswirtschaftlicher Mehrwert

Die digitale Spedition ermöglicht es, schnell und einfach verschiedene Anbieter auf dem Markt anzufragen und zu vergleichen. Das senkt die Transaktionskosten durch die digitale Kundenschnittstelle und schafft mehr Markt- und Preistransparenz. Ausserdem werden die angebotenen Fahrten an Frachtenbörsen oft zu günstigen Preisen gehandelt, um kostenintensive Leerfahrten zu vermeiden. Dies führt zu einer höheren Auslastung des Spediteurs und spart Kosten für den Verlader. Gesamtwirtschaftlich ist dieses Geschäftsmodell aber auch kritisch zu sehen, da durch die Digitalisierung an anderer Stelle Mitarbeiter wegfallen können (Seeßle, 2019).



12 Literaturverzeichnis Anhänge

Geofencing

Heise, L. (o. D.). *Einsatz von Lkw Telematik: Nutzen und Aufgaben in der Fahrzeugflotte.*

Vimcar. Abgerufen von: <https://vimcar.de/boxenstopp/blog/lkw-telematik/>

Johanning, R. (2017, 10. August). *Die nominierten Systeme stehen fest.* Eurotransport.

Abgerufen von: <https://www.eurotransport.de/artikel/deutscher-telematik-preis-2018-die-nominierten-systeme-stehen-fest-9176346.html>

LOSTnFOUND. (o. D.). *Telematiksysteme für den professionellen Einsatz - fleet.tech.*

fleet.tech. Abgerufen von: <https://fleet.tech/>

Neitzel, D. (2019, 19. August). *Telematik: Wie der Einkauf von vernetzten Lkw profitiert.*

Technik Einkauf. Abgerufen von: <https://www.technik-einkauf.de/technik/telematik-wie-der-einkauf-von-vernetzten-lkw-profitiert-2-110.html>

Schaefer. (o. D.). *Webfleet Solutions.* Abgerufen von: <https://schaefer-ag.ch/tomtom-telematics>

Trailer world (2014). *We think Transport. Transport, Verkehr und Mobilität neu denken.*

Kundenmagazin. Abgerufen von:

https://www.bpw.de/fileadmin/user_upload/Ueber_uns/Unsere_Informationsmedien/trailer_world/tw2014_02_DE.pdf

Trendfire Technologies. (o. D.). *LKW-Telematik für Speditionen, Transport und Logistik –*

Trendfire Technologies. Abgerufen von: <https://www.trendfire.com/de/telematik-speditionen/>

VerkehrsRundschau. (2019). *Telematik-Spezial* (Nr. 36). Springer Fachmedien München GmbH. Abgerufen von:

https://www.verkehrsrundschau.de/fm/3576/TelematikSpezial36_2019.pdf

Vimcar. (o. D.). *Geofencing.* Abgerufen von: <https://vimcar.de/boxenstopp/lexikon/geofencing/>



Webfleet Solutions. (2020, 30. Juli). *Geofencing: 3 Möglichkeiten, die Kosten des Fuhrparks zu senken*. Abgerufen von: https://www.webfleet.com/de_de/webfleet/blog/3-moeglichkeiten-mit-geofencing-die-fuhrparkkosten-zu-reduzieren/

Neue Ladehilfsmittel

Clean Intralogistics Net. (o. D.). *H2IntraDrive – BMW Werk in Leipzig erhält Stapler und Schlepper mit Wasserstoffantriebe*. Abgerufen von: <https://www.cleanintralogistics.net/portfolio-item/bmw-werk-leipzig/>

Duessel-Stapler Helmuth Poensgen. (o. D.). *Die Geschichte des Gabelstaplers*. Abgerufen von: <https://duessel-stapler.de/de/die-geschichte-des-gabelstaplers>

Handelsblatt. (o. D.). *Kion Group*. Abgerufen von: <https://www.handelsblatt.com/themen/kion-group>

Hebezeuge Fördermittel. (2013). *Robust und zuverlässig*. Abgerufen von: https://www.technische-logistik.net/sites/default/files/Fachartikel/HF1213_Brennstoffzellen_Stapler_im_Pilotprojekt_web.pdf

Hofmann, B. (2016, 12. Oktober). *Die Stromer kommen gut an*. MM Logistik. Abgerufen von: <https://www.mm-logistik.vogel.de/die-stromer-kommen-gut-an-a-553718/>

Hompel, M. & Heidenblut, V. (2011a, April 10). *Schubmaststapler*. Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik. Abgerufen von: <http://www.logipedia.de/lexikon/Schubmaststapler>

Hompel, M. & Heidenblut, V. (2011b, April 10). *Vierwegestapler*. Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik. Abgerufen von: <http://www.logipedia.de/lexikon/Vierwegestapler>

Logistik Knowhow. (2013, 13. Juli). *Gabelstapler*. Abgerufen von: <https://logistikknowhow.com/materialfluss-und-transport/gabelstapler/>



- Logistra. (2021, 11. März). *Erster Diesel-Hybrid von Toyota*. Abgerufen von:
<https://logistra.de/news/nfz-fuhrpark-lagerlogistik-intralogistik-erster-diesel-hybrid-von-toyota-10031.html>
- Poll, D. (2020, 24. September). *Warum Staplerflotten künftig mit Wasserstoff fahren*. Produktion Online. Abgerufen von: <https://www.produktion.de/technik/warum-staplerflotten-kuenftig-mit-wasserstoff-fahren-106.html>
- Schweikl, T. (2016, 26. Juli). *Gabelstapler: Diesel-Hybrid-Antrieb unterschreitet Abgasgrenzwerte*. Logistra. Abgerufen von: <https://logistra.de/news/nfz-fuhrpark-lagerlogistik-intralogistik-gabelstapler-diesel-hybrid-antrieb-unterschreitet-abgasgrenzwerte-12468.html>
- Staplerberater. (o. D.). *Stapler: Elektro- oder Verbrennungsmotor?* Abgerufen von:
<https://www.staplerberater.de/service/ratgeber/stapler-elektro-oder-verbrennungsmotor>
- Statista. (2020, 12. Juni). *Weltweiter Absatz von Elektro-Gabelstaplern* nach Region in den Jahren 2018 und 2019*. Abgerufen von:
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/239120/umfrage/weltweiter-absatz-von-elektro-gabelstaplern-nach-region/>
- Statista. (2021, 7. Januar). *Größte Hersteller von Flurförderzeugen weltweit nach Marktanteil im Geschäftsjahr 2019/2020*. Abgerufen von:
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/285789/umfrage/flurfoerderzeug-groesste-hersteller-weltweit-nach-marktanteil/>
- STILL. (o. D.). *Gabelstapler und Lagertechnik - STILL Deutschland*. Abgerufen von:
<https://www.still.de/fahrzeuge/gabelstapler-und-lagertechnik.html>
- Toyota Material Handling Schweiz. (o. D.). *Flurförderzeuge*. Abgerufen von: <https://toyota-forklifts.ch/unsere-produkte/?page=1&sortStrategy=0>

Aerodynamische Verbesserungen

- Burkhart, U. & Pfeifle, C. (2020, 19. Februar). *Sparsam dank Aerodynamik: Der neue Actros ist auf Effizienz getrimmt*. Daimler. Abgerufen von:



<https://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Sparsam-dank-Aerodynamik-Der-neue-Actros-ist-auf-Effizienz-getrimmt.xhtml?oid=45659918>

Community Research and Development Information Service. (2020, 17. November). *Periodic Reporting for period 2 - AEROFLEX (Aerodynamic and Flexible Trucks for Next Generation of Long Distance Road Transport)*. Abgerufen von: <https://cordis.europa.eu/project/id/769658/reporting>

Don-Bur (Bodies & Trailers). (o. D.). *Aerodynamic Teardrop Trailer*. Abgerufen von: <https://donbur.co.uk/gb-en/products/aerodynamic-teardrop-trailer.php>

DVZ (2019). *Vorgezogener Starttermin für Lkw mit aerodynamischen Verbesserungen*. Abgerufen von: <https://www.dvz.de/rubriken/politik/detail/news/vorgezogener-starttermin-fuer-lkw-mit-aerodynamischem-front-design.html>

Eschmeier, J. (2017, 10. August). *Ressourcen sparen beflügelt*. DHL Freight Connections. Abgerufen von: <https://dhl-freight-connections.com/de/saving-resources-inspires/>

Frank, T. (2012). *Aerodynamik von schweren Nutzfahrzeugen*. Forschungsvereinigung Automobiltechnik. Abgerufen von: https://www.vda.de/dam/vda/publications/FAT-SCHRIFTENREIHE%20241/1331890438_de_2142158707.pdf

Indinger, T. & Devesa, A. (2012, 1. Juli). *Verbrauchsreduktion bei Nutzfahrzeug-Kombinationen Durch Aerodynamische Massnahmen*. ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift. <https://doi.org/10.1007/s35148-012-0405-0>

Jesgulke, O. (2017, 30. Mai). *Aerodynamik für Lkw: Gegen alle Widerstände*. Toll Collect-Blog. Abgerufen von: <https://toll-collect-blog.de/aerodynamik-fuer-lkw-gegen-alle-widerstaende/>

Lanzinger, R. (2013, 4. Juli). *Aerodynamik bei Lkw: Interview mit Dr. Christian Wiehen von Wabco*. Krafthand Medien. Abgerufen von: <https://www.krafthand.de/truck/artikel/aerodynamik-bei-lkw-interview-mit-dr-christian-wiehen-von-wabco-1706/>

Lischke, A. (o. D.). *AEROFLEX: Aerodynamische und flexible Fernverkehrs-Lkw der nächsten Generation*. Abgerufen von: Institut für Verkehrsforschung. Abgerufen am



13. Februar 2021, von https://www.dlr.de/vf/desktopdefault.aspx/tabid-2974/1445_read-50221/

Paschotta, R. (o. D.). *Luftwiderstand*. RP Photonics Consulting. Abgerufen von: <https://www.energie-lexikon.info/luftwiderstand.html>

Pudenz, K. (2012, 5. Juli). *Unterboden mit Flügel: DLR erforscht aerodynamischen Lkw*. Springer Fachmedien Wiesbaden. Abgerufen von: <https://www.springerprofessional.de/automobil---motoren/nutzfahrzeuge/unterboden-mit-fluegel-dlr-erforscht-aerodynamischen-lkw/6575478>

WABCO Holdings. (o. D.-a). *OptiFlowTM SideWings*. Abgerufen von: https://www.wabco-customercentre.com/catalog/de_DE/trailer/retrofit-solutions/optiflow-sidewings?cclcl=de_DE

WABCO Holdings. (o. D.-b). *OptiFlowTM Tail*. Abgerufen von: https://www.wabco-customercentre.com/catalog/de_DE/trailer/retrofit-solutions/optiflow-tail?cclcl=de_DE

WABCO Holdings. (2020). *OptiFlow*. Abgerufen von: https://www.wabco-customercentre.com/catalog/de_CH/trailer/retrofit-solutions/optiflow--aerodynamics/optiflow-nosefairings?cclcl=de_CH

Alternative Trailer / Auflieger

Berger Fahrzeugtechnik. (o. D.). *Die Zukunft ist leicht: Sattelaufliieger von BERGERecotrail®*. Abgerufen von: <https://www.berger-ecotrail.com/>

Berger Fahrzeugtechnik. (2012, April). *Studie: Nutzlastoptimierte Fahrzeuge mit wirtschaftlichen und ökologischen Vorteilen*. Abgerufen von: https://www.berger-ecotrail.com/fileadmin/userdaten/dokumente/Pressedownloads/BERGERNews02_AN SICHT.pdf

Dreher, M. (2010, Juni). 2. *Generation Trailer-Telematik mit Benefits für Logistiker, Fuhrparkmanager und Spediteure*. Telematik-Markt. Abgerufen von: <https://telematik-markt.de/telematik/2-generation-trailer-telematik-mit-benefits-f%C3%BCr-logistiker-fuhrparkmanager-und-spediteure#.X8S-BdBKuUk>



- DVZ (2020). *Bund will Anschaffung CO2-effizienter Auflieger fördern*. Abgerufen von: <https://www.dvz.de/rubriken/politik/detail/news/bund-will-anschaffung-co2-effizienter-auflieger-foerdern.html>
- Galos, J., Sutcliffe, M. & Cebon, D. (2014, November). *Design of a lightweight heavy goods vehicle trailer*. In European Transport Conference.
<https://doi.org/10.13140/rg.2.1.5113.0007>
- Kienzler, H., Wittenbrink, P. & Hagenlocher, S. (2012, März). *Studie über wirtschaftliche und ökologische Vorteile von nutzlastoptimierten Fahrzeugen im LKW-Verkehr*. Abgerufen von: https://www.berger-ecotrail.com/uploads/media/hwh_K_P_Transport_Consultants_2012_02.pdf
- Kögel Trailer. (o. D.). *Kögel Light Plus*. Abgerufen von: <https://www.koegel.com/de/lkw-trailer/auflieger/pritschenaufleger/leichtbau-anhaenger-plus/>
- Schmitz Cargobull. (2020, September). *Für ein effizientes und optimiertes digitales Transportmanagement – Telematik im Sattelcurtainsider S.CS SMART*. Abgerufen von: <https://www.cargobull.com/ch/presse/2020/telematik-im-sattelcurtainsider-scs-smart>
- SKF Group. (o. D.). *Reifendruck-Kontrollsystem*. Abgerufen von: <https://www.skf.com/ch/de/industries/trucks-trailer-buses/wheel-end/skf-tyre-pressure-monitoring-system>
- SKF Group. (2015, März). *SKF Tyre Pressure Monitoring System*. Abgerufen von: https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d1968039e41d-SKF-Tyre-Pressure-Monitoring-System_tcm_12-229520.pdf#cid-229520
- Telematik-Markt. (2010, 21. Dezember). *Trailer-Telematik: Ortung und Diebstahlschutz hoch, Kosten runter*. Abgerufen von: <https://telematik-markt.de/telematik/trailer-telematik-ortung-und-diebstahlschutz-hoch-kosten-runter-0#.X8TbENBKikUk>
- TIP Trailer Services Germany. (2020, 1. Juli). *TIP Telematik*. Abgerufen von: <https://www.tipeurope.de/tip-telematik>



VerkehrsRundschau. (2020, 2. November). *Telematik im Sattelcurtainsider S.CS SMART*.

Abgerufen von: <https://www.verkehrsrundschau.de/nachrichten/telematik-im-sattelcurtainsider-s-cs-smart-2679179.html/1605225>

Wolf, A. (2018, 10. Mai). *Wie sich mit Telematik Kosten und Zeit sparen lassen*. Fuhrpark.

Abgerufen von: <https://www.fuhrpark.de/wie-sich-mit-telematik-kosten-und-zeit-sparen-lassen>

BEV: Batterie-elektrischer Antrieb

Ammann, L. (2017, 14. Juni). *Elektrolastwagen macht Müllabfuhr zur sauberen Sache*.

Designwerk Group. Abgerufen von: <https://www.designwerk.com/elektrolastwagen-macht-muellabfuhr-zur-sauberen-sache/>

Bönnighausen, D. (2019, 24. September). *RouteCharge: Batteriewechselsystem beim E-Lkw*

(Video). electrive. Abgerufen von: <https://www.electrive.net/2019/09/24/routecharge-batteriewechselsystem-beim-e-lkw-video/>

Butter, I. (2020, 9. Januar). *Elektro-LKW 2021: Hersteller & Modelle von Elektro-*

Transporter. Efahrer. Abgerufen von: https://efahrer.chip.de/e-wissen/e-lastwagen-2021-hersteller-modelle-von-elektro-lkw_10378

Deutsche Energie-Agentur. (o. D.). *Elektrofahrzeuge (BEV/PHEV/REEV)*. Abgerufen von:

<https://www.pkw-label.de/alternative-antriebe/elektrofahrzeuge-bevphevreev>

Die Welt. (2019, 21. Juni). *Erste Bilanz mit Hybrid-Scania: Pilotprojekt Oberleitungs-Lkw*.

Abgerufen von: <https://www.welt.de/motor/news/article195681607/Erste-Bilanz-mit-Hybrid-Scania-Pilotprojekt-Oberleitungs-Lkw.html>

Ecomento. (2019, 19. Juni). *Feldversuch mit Oberleitungs-Lkw auf der A5: Scania*

veröffentlicht erste Ergebnisse. Abgerufen von:

<https://ecomento.de/2019/06/19/oberleitungs-lkw-auf-der-a5-scania-veroeffentlicht-erste-ergebnisse/>

Ecomento. (2020, 17. März). *Mode-Logistiker plant Einsatz von E-Lkw mit Batterie-*

Wechselsystem. Abgerufen von: <https://ecomento.de/2020/03/17/mode-logistiker-auf-elektro-umgeruesteter-lkw-und-wechselbatterie-fahrzeug/>



- Feldschlösschen. (2020, 5. Februar). *20 neue 26-Tonnen-Elektro LKW für*. Abgerufen von: <https://feldschloesschen.swiss/de/medienmitteilungen/20-neue-26-tonnen-elektro-lkw-fur-feldschlosschen/>
- Finke, C. (2020, 17. April). *Corona-Krise bremst Tests auf eHighway aus*. Autozeitung. Abgerufen von: <https://www.autozeitung.de/elektro-lkw-schweden-130948.html>
- Günter Pauli GmbH. (2017, 29. Dezember). *Der Elektromotor: Funktion, Aufbau, Typen und Einsatzgebiete*. Abgerufen von: <http://www.pauli-gmbh.de/elektromotoren-know-how/elektromotor-funktion-aufbau-typen-einsatz/>
- Höhne, K., Trützscher, J., Teichmann, G. A., Schäfer, P. K. & Hermann, A. (2012, 1. Januar). *Normen schaffen Sicherheit*. ResearchGate. Abgerufen von: https://www.researchgate.net/figure/Abbildung-1-SWOT-Analyse-Elektromobilitaet-Quelle-PwC-Fraunhofer-LBF-FH-FFM_fig1_259193218
- Kuther, T. (2020, 29. Februar). *Elektro-Lkw: Warum lange laden, statt schnell zu wechseln?* next-mobility. Abgerufen von: <https://www.next-mobility.de/elektro-lkw-warum-lange-laden-statt-schnell-zu-wechseln-a-909319/>
- Laiva, L. (2020, 16. Januar). *E-Mobilität: Das Ladenetz der Schweiz ist besser als sein Ruf*. Energie Experten. Abgerufen von: <https://www.energie-experten.ch/de/mobilitaet/detail/e-mobilitaet-das-ladenetz-der-schweiz-ist-besser-als-sein-ruf.html>
- ÖAMTC. (o. D.). *Elektromobilität in Österreich*. Abgerufen von: <https://www.oeamtc.at/thema/elektromobilitaet/>
- Schatzmann, M. (2019, 11. Dezember). *Verkaufsstart der Volvo FL Electric und Volvo FE Electric*. TIR transNews. Abgerufen von: <https://www.tir-transnews.ch/verkaufsstart-der-volvo-fl-electric-und-volvo-fe-electric/>
- Thielmann, A., Wietschel, M., Funke, S., Grimm, A., Hettesheimer, T., Langkau, S., Loibl, A., Moll, C., Neef, C., Plötz, P., Sievers, L., Espinoza, L. T. & Edler, J. (2020, Januar). *Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf*. Abgerufen von: <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2020/Faktencheck-Batterien-fuer-E-Autos.pdf>



Werwitzke, C. (2019, 11. Februar). *Zahl der E-Fahrzeuge klettert weltweit auf 5,6 Millionen*. Electrive. Abgerufen von: <https://www.electrive.net/2019/02/11/zahl-der-e-fahrzeuge-klettert-weltweit-auf-56-millionen/>

Brennstoffzelle

Baxter, T. (2020, 3. Juni). *Hydrogen cars won't overtake electric vehicles because they're hampered by the laws of science*. The Conversation. Abgerufen von: <https://theconversation.com/hydrogen-cars-wont-overtake-electric-vehicles-because-theyre-hampered-by-the-laws-of-science-139899>

Bundesamt für Energie. (o. D.). *Brennstoffzellen*. Abgerufen von: <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/energieeffizienz/brennstoffzellen.html>

Chemie.de. (o. D.). *Brennstoffzellenfahrzeug*. Abgerufen von: <https://www.chemie.de/lexikon/Brennstoffzellenfahrzeug.html>

European Federation for Transport and Environment. (2017, Juni). *Roadmap to climate-friendly land freight and buses in Europe*. Abgerufen von: https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/Full_%20Roadmap%20freight%20buses%20Europe_2050_FINAL%20VERSION_corrected%20%282%29.pdf

E4tech. (2018, Dezember). *The Fuel Cell Industry Review 2018*. <http://www.fuelcellindustryreview.com/archive/TheFuelCellIndustryReview2018.pdf>

Förderverein H2 Mobilität Schweiz. (o. D.). *Tankstellen*. Abgerufen von: <https://h2mobilitaet.ch/tankstellen/>

Gnann, T., Wietschel, M., Kühn, A., Thielmann, A., Sauer, A., Plötz, P., Moll, C., Stütz, S., Schellert, M., Rüdiger, D., Wassmuth, V. & Paufler-Mann, D. (2017). *Brennstoffzellen-Lkw: kritische Entwicklungshemmnisse, Forschungsbedarf und Marktpotential*. Studie im Rahmen der wissenschaftlichen Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung, Fraunhofer ISI, Karlsruhe, Fraunhofer IML, Dortmund, PTV Transport Consult GmbH, Karlsruhe. Abgerufen



von: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/MKS/teilstudie-brennstoffzellen-lkw.pdf?__blob=publicationFile

Gomoll, W. (2020, 13. Juli). *Brennstoffzelle im Lkw: Wird die Zukunft elektrisch?* autobild.de. Abgerufen von: <https://www.autobild.de/artikel/brennstoffzelle-im-lkw-16991443.html>

H2 Energy. (2017, Juni). *Weltweit erster Wasserstoff-LKW mit Anhänger, der die LKW-Anforderungen für die Coop-Logistik erfüllen kann.* Abgerufen von: https://h2energy.ch/wp-content/uploads/2017/06/Factsheet_Lastwagen_D.pdf

H2 Mobility Deutschland. (o. D.). *H2.LIVE: Wasserstofftankstellen in Deutschland & Europa.* Abgerufen von: <https://h2.live/>

Hampel, C. (2020, 6. Juli). *Hyundai delivers the first H2 trucks in Switzerland.* electrive.com. Abgerufen von: <https://www.electrive.com/2020/07/06/hyundai-delivers-the-first-h2-trucks-in-switzerland/>

Hommen, M. (2019, 4. Oktober). *Warum das Wasserstoffauto 2020 noch keine Alternative ist.* Handelsblatt. <https://www.handelsblatt.com/auto/test-technik/neue-mobilitaet-warum-das-wasserstoffauto-noch-keine-alternative-ist/25084978.html?ticket=ST-4576925-yBgKcc7hcaP52BX4PLBY-ap3>

Hüppi, D. (2019, 10. Oktober) *Honda nur noch "E" - Toyota setzt auf Wasserstoff.* Moto.ch. <https://www.moto.ch/honda-nur-noch-e-toyota-setzt-auf-wasserstoff/>

Internationales Verkehrswesen. (2020a, März 23). *Toyota und Hino entwickeln schweren Brennstoffzellen-LKW.* Abgerufen von: <https://www.internationales-verkehrswesen.de/toyota-und-hino-entwickeln-schweren-brennstoffzellen-lkw/>

Internationales Verkehrswesen. (2020b, Juli 8). *Hyundai liefert in der Schweiz erste Brennstoffzellen-LKW aus.* Abgerufen von: <https://www.internationales-verkehrswesen.de/hyundai-liefert-in-der-schweiz-erste-brennstoffzellen-lkw-aus/>

Norddeutscher Rundfunk. (2019, 13. Dezember). *Konkurrenz durch Elektroautos: Haben Wasserstoffautos eine Chance?* tagesschau.de. Abgerufen von: <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/boerse/wasserstoffautos-101.html>



- Scania. (2020a, 20. Januar). *How does a hydrogen fuel cell electric truck work?* Abgerufen von: <https://www.scania.com/group/en/home/newsroom/news/2020/how-does-a-hydrogen-fuel-cell-electric-truck-work.html>
- Scania. (2020b, 20. Januar). *Norwegian wholesaler ASKO puts hydrogen powered fuel cell electric Scania trucks on the road.* Abgerufen von: <https://www.scania.com/group/en/home/newsroom/news/2020/norwegian-wholesaler-asko-puts-hydrogen-powered-fuel-cell-electric-scania-trucks-on-the-road.html>
- Schmidt, H. (2020, 15. Februar). Endlich brennen die Zellen. *Neue Zürcher Zeitung*. abgerufen von: <https://www.nzz.ch/mobilitaet/auto-mobil/wasserstoffantrieb-im-kommen-endlich-brennen-die-zellen-ld.1539683>
- Steffen, A. D. (2020, 4. März). *Norwegian Wholesaler Asko Has Begun Using Hydrogen Fuel Cell Trucks*. Intelligent Living. Abgerufen von: <https://www.intelligentliving.co/asko-hydrogen-fuel-cell-trucks/>
- Stegmaier, G. (2020, 30. Juni). *Die Wahrheit über die Brennstoffzelle*. Auto Motor und Sport. Abgerufen von: https://www.auto-motor-und-sport.de/tech-zukunft/alternative-antriebe/wasserstoffauto-brennstoffzelle-co2-neutral-batterie-lithium/#anchor_6
- Vogel, B. (2021, 27. Januar). *In Rothenburg kann ab sofort Wasserstoff getankt werden*. Luzerner Zeitung. Abgerufen von: <https://www.luzernerzeitung.ch/zentralschweiz/luzern/in-rothenburg-kann-ab-sofort-wasserstoff-getankt-werden-ld.2090190>
- Weichenhain, U., Lange, S., Koolen, J., Benz, A., Hartmann, S., Heilert, D., Henninger, S. & Kallenbach, T. (2020, Februar). *Potenziale der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie in Baden-Württemberg*. Abgerufen von: https://www.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/mum/intern/Dateien/Dokumente/6_Wirtschaft/Ressourceneffizienz_und_Umwelttechnik/Wasserstoff/200724-Potentialstudie-H2-Baden-Wuerttemberg-bf.pdf



Diesel

ADAC. (2019, 18. Oktober). *Dieselfahrverbot: Alle Fragen und Antworten*. Abgerufen von: <https://www.adac.de/verkehr/abgas-diesel-fahrverbote/fahrverbote/dieselfahrverbot-faq/>

BiomassMuse. (o. D.). *Unnötig! Reiner Biodiesel (B100) von deutschen Tankstellen verschwunden*. Abgerufen von: <https://www.biomasse-nutzung.de/biodiesel-b100-tankstellen-verschwunden/>

Coop Genossenschaft. (2018, Mai). *Fortschrittsbericht Nachhaltigkeit der Coop-Gruppe*. Abgerufen von: https://report.coop.ch/app/uploads/coop-fortschrittsbericht-nachhaltigkeit-2017_de.pdf

Coop Genossenschaft. (o. D.). *Wir packen organische Abfälle in den Tank*. Coop. Abgerufen von: <https://www.taten-statt-worte.ch/de/unsere-taten/tat-nr-129.html>

CosmosDirekt. (o. D.). *Biodiesel – Kraftstoff aus Pflanzenöl*. Abgerufen von: <https://www.cosmosdirekt.de/autoversicherung/biodiesel/>

Duden Learnattack. (o. D.). *Dieselmotor in Physik*. lernhelfer. Abgerufen von: <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik/artikel/dieselmotor>

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. (o. D.). *Biodiesel*. FNR - Biokraftstoffe. Abgerufen von: <https://biokraftstoffe.fnr.de/kraftstoffe/biodiesel>

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. (2020, September). *Basisdaten Bioenergie 2020*. Abgerufen von: https://www.fnr.de/fileadmin/Projekte/2020/Mediathek/broschuere_basisdaten_bioenergie_2020_web.pdf

Kober, T., Bauer, C., Bach, C., Beuse, M., Georges, G., Held, M., Heselhaus, S., Korba, P., Küng, L., Malhotra, A., Moebus, S., Parra, D., Roth, J., Rüdisüli, M., Schildhauer, T., Schmidt, T. J., Schmidt, T. S., Schreiber, M., Segundo Sevilla, F. R., ... Teske, S. L. (2019, Juli). *Power-to-X: Perspektiven in der Schweiz*. Paul Scherrer Institut. Abgerufen von: https://www.psi.ch/sites/default/files/2019-07/Kober-et-al_2019_Weissbuch-P2X.pdf



Lehman, C. (o. D.). *Biodiesel*. Encyclopedia Britannica. Abgerufen von:

<https://www.britannica.com/technology/biodiesel>

Leitner, U. & Laudan, F. (2019, 3. Januar). *Bestes Absatzergebnis der letzten 10 Jahre:*

Daimler Trucks verkauft in 2018 deutlich über 500.000 Lkw - Daimler Global Media Site. Daimler. Abgerufen von:

<https://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Bestes-Absatzergebnis-der-letzten-10-Jahre-Daimler-Trucks-verkauft-in-2018-deutlich-ueber-500000-Lkw.xhtml?oid=42156131>

Lichtblau, G. (2012). *Ökobilanzen ausgewählter Biotreibstoffe*. Umweltbundesamt.

Abgerufen von:

<https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0360.pdf>

Nördinger, S. & Pankow, G. (2016, 28. Juli). *Die 10 größten Lkw-Hersteller der Welt*.

Produktion Online. Abgerufen von: <https://www.produktion.de/bildergalerien/die-10-groessten-lkw-hersteller-der-welt-114.html>

Randelhoff, M. (2019, 5. Juli). *Batterieelektrisch vs. Brennstoffzelle (H2) vs. Power-to-X im*

Straßenverkehr: Energieeffizienz, Wirkung auf das Energiesystem, Infrastruktur, Kosten und Ressourcen. Zukunft Mobilität. Abgerufen von: <https://www.zukunft-mobilitaet.net/169895/analyse/elektroauto-brennstoffzelle-synthetische-kraftstoffe-ptx-ptl-kosten-infrastruktur-rohstoffe-energiebedarf-wirkungsgrad/>

Rudschies, W. (2019, 6. Dezember). *Synthetische Kraftstoffe – Energieträger der Zukunft?*

ADAC. Abgerufen von: <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/synthetische-kraftstoffe/>

Scania Schweiz. (o. D.). *Biodiesel (FAME)*. Abgerufen von:

<https://www.scania.com/ch/de/home/products-and-services/trucks/sustainability/bio/biodiesel.html>

Schadwinkel, A. (2019, 24. Januar). *Was die Wissenschaft über Abgase weiß – und was nicht*.

Die Zeit. Abgerufen von: <https://www.zeit.de/wissen/gesundheit/2019-01/stickoxide-gesundheit-feinstaub-luftverschmutzung>

Schoeni Transport. (o. D.). *Nachhaltigkeit*. Abgerufen von: <https://schoeni.ch/nachhaltigkeit/>



Shell (Switzerland). (o. D.). *Shell Diesel mit bis zu 7% Biodiesel*. Shell. Abgerufen von:
https://www.shell.ch/de_ch/autofahrer/shell-treibstoffe/technische-informationen/shell-diesel-mit-bis-zu-7-biodiesel.html

Statista. (2020, 31. Juli). *Lkw-Bestand in Deutschland nach Kraftstoffarten 2020*. Abgerufen von: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/468860/umfrage/lkw-bestand-in-deutschland-nach-kraftstoffarten/>

Tranton. (2020, 24. Januar). *TRATON GROUP baut Präsenz in China aus*. Abgerufen von:
https://traton.com/de/newsroom/pressemitteilungen/Pressemitteilung_24112020.html

Verband der Schweizerischen Biotreibstoffindustrie. (o. D.). *Biotreibstoffe*. Biofuels Schweiz.
 Abgerufen von: <https://www.biofuels-schweiz.ch/?id=17&lang=de>

CNG, LNG und Power-to Gas

ADAC. (2020, 11. Dezember). *Synthetische Kraftstoffe – Energieträger der Zukunft?*
 Abgerufen von: <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/synthetische-kraftstoffe/>

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. (o. D.). *Identifizierung von Hemmnissen der Nutzung von LNG und CNG im schweren Lkw-Verkehr sowie Möglichkeiten zu deren Überwindung*. Abgerufen von:
<https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/MKS/lng-cng-schwere-lkw.html>

CNG-Club (2020). *Das aktuelle Marktangebot bei CNG-Bussen, CNG-Lkw und LNG-Lkw*.
 Abgerufen von: https://www.cng-club.de/cng_lkw_busse

Fachverband Gas Wärme. (o. D.). *Technik*. Erdgas Autos. Abgerufen von:
<https://www.erdgasautos.at/fahren/technik/#:%7E:text=Wie%20funktioniert%20ein%20CNG%20Antrieb,in%20die%20Zylinder%20transportiert%20werden.&text=Dort%20mischt%20es%20sich%20mit,als%20Gas%20Luft%20Gemisch>

Gibgas - consulting/medien. (o. D.). *Anzahl der CNG-Fahrzeuge in Deutschland*. Abgerufen von: <https://www.gibgas.de/Fahrzeuge/Historie/Statistik>



- Krummen Kerzers. (2019, 13. September). *Nachhaltigkeit: Krummen Kerzers weitet LNG-Projekt mit Lidl Schweiz aus*. Abgerufen von: <https://krummen.com/aktuelles/nachhaltigkeit-krummen-kerzers-weitet-lng-projekt-aus/>
- Neumann, H. (2020, 2. Dezember). *Immer mehr Lkw fahren mit Flüssigerdgas*. top agrar. Abgerufen von: <https://www.topagrar.com/energie/news/immer-mehr-lkw-fahren-mit-fluessigerdgas-12419955.html>
- Niess, F. (2018, 11. Juni). *Aldi Süd fährt umweltfreundlich*. Eurotransport. Abgerufen von: <https://www.eurotransport.de/artikel/langzeit-test-mit-erdgas-lkw-von-iveco-aldi-sued-faehrt-umweltfreundlich-10180357.html>
- Punkt4info. (2020, 14. Mai). *Energieversorger wollen sauberes Gas im Norden erzeugen*. Abgerufen von: <https://punkt4.info/die-ausgaben/details/news/energieversorger-wollen-sauberes-gas-im-norden-erzeugen/punkt4-edition-name/swiss-export-news/punkt4-edition-section/15950.html>
- Scania Deutschland. (o. D.). *Praxistipps zu Scania Erdgas Lkw*. Abgerufen von: <https://www.scania.com/de/de/home/products-and-services/articles/vorteile-erdgas-lkw.html>
- Texas University Partnerships. (o. D.). *SWOT Analysis CNG as a fuel for public transportation*. Abgerufen von: <http://txunivcng.weebly.com/cng-as-fuel-for-public-transportation.html>
- VerkehrsRundschau. (2020, 7. Oktober). *Jetzt doch keine Mautbefreiung von gasbetriebenen Lkw?* Abgerufen von: <https://www.verkehrsrundschau.de/nachrichten/jetzt-doch-keine-mautbefreiung-von-gasbetriebenen-lkw-2669929.html>
- Zukunft Gas. (o. D.-a). *Erdgas-Lkw Scania G-Reihe – Der Robuste mit 340 PS*. Abgerufen von: <https://www.erdgas.info/erdgas-mobil/erdgas-fahrzeuge/scania/scania-pg-cng-340/>
- Zukunft Gas. (o. D.-b). *Erdgas-Lkw Scania P-Serie –die starke Sattelzugmaschine*. Abgerufen von: <https://www.erdgas.info/erdgas-mobil/erdgas-fahrzeuge/scania/scania-p-280/>



Tankstellen Erdgas

Adolf, J., Balzer, C., Kofod, M., Lenz, B., Lischke, A., Knitschky, G., Wirz, F. & Wendland, M. (2019). *Verflüssigtes Erdgas - Neue Energie für Schiff und LKW*. Shell Deutschland Oil GmbH. Abgerufen von: https://www.shell.de/medien/shell-publikationen/shell-lng-studie/_jcr_content/par/toptasks.stream/1550153767627/8156fa56cf326a600ee9330a0d109159597d931e/lng-studie-web-red.pdf

Albus, R., Graf, F. & Krause, H. (2016, Mai). *Potenzialstudie zu LNG in der Mobilität*. Abgerufen von: <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/forschung/berichte/g201508ms.pdf>

BarMalGas. (o. D.). *LNG Tankstellen*. Abgerufen von: <https://barmalgas.de/lng/lng-tankstellen-netz>

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. (2011, Dezember). *Identifizierung von Hemmnissen der Nutzung von LNG und CNG im schweren Lkw-Verkehr sowie Möglichkeiten zu deren Überwindung*. Abgerufen von: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/MKS/studie-nutzung-lng-cng-schwere-lkw.pdf?__blob=publicationFile

DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches. (2016). *Genehmigungsleitfaden für LNG / LCNG-Tankstellen*. Abgerufen von: <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/forschung/gas/genehmigungsleitfaden-lng-lcng-tankstellen-dvgw.pdf>

Energie, Wasser-Praxis. (2018, 17. August). *Drei LNG-Tankstellen für die Schweiz*. Abgerufen von: <https://www.energie-wasser-praxis.de/mobilitaet/artikel/drei-lng-tankstellen-fuer-die-schweiz/>

Energie Informationsdienst (o.D.). *LNG-Tankstellen in Deutschland*. Abgerufen von: https://www.eid-aktuell.de/login.html?redirect_url=/nachrichten/mobilitaet/detail/news/lng-tankstellen-die-heimlichen-champions.html#:~:text=Mittlerweile%20gibt%20es%20in%20Deutschland%2024%20LNG%2DTankstelle



Energie360 (o.D.). *CNG-Tankstellen in der Schweiz*. Abgerufen von:

<https://www.energie360.ch/de/archiv/e-mobility-alt/gasauto/gastankstelle-finden/>

Fachverband Gas Wärme. (o. D.). *Tanken in Österreich*. Abgerufen von:

[https://www.erdgasautos.at/tanken/tanken-in-oesterreich/#:%7E:text=Ausreichend%20Tankstellen,\(Stand%3A%20Oktober%202020\).](https://www.erdgasautos.at/tanken/tanken-in-oesterreich/#:%7E:text=Ausreichend%20Tankstellen,(Stand%3A%20Oktober%202020).)

Hine. (2019, 23. Dezember). *Die HINE AG begleitet das Zulassungsverfahren der ersten LNG Tankstellen in der Schweiz*. Abgerufen von:

https://hine.ch/news/zulassungsverfahren_lng_tankstellen/

Klukas, A., Stütz, S., Dobers, K., Kirsch, D., Rüdiger, D., Köhler, J. & Timmerberg, S. (2017, März). *Teilstudie „Entwicklung von Maßnahmenbündeln zur Förderung von CNG/LNG zur Unterstützung der CPT-Initiative“*. Abgerufen von:

https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/MKS/studie-foerderung-cng-lng-zur-cpt-initiative.pdf?__blob=publicationFile

Liquind 24/7. (o. D.). *LNG-Tankstellen für Deutschland*. Abgerufen von:

<https://liquind.com/ueber-liquind/>

Liqvis. (o. D.). *LNG-Tankstelle finden – das Netz heute & in der Zukunft*. Abgerufen von:

<https://www.liqvis.com/lng-tankstelle.html>

Logistik Online. (2019, 23. November). *Lidl Schweiz und Krummen Kerzers gewinnen*.

Abgerufen von: <https://logistik-online.ch/intralogistik/detail/lidl-schweiz-und-krummen-kerzers-gewinnen/>

Neumann, H. (2016, 30. Juni). *Deutschlands erste LNG-Tankstelle für Lkw*. top agrar.

Abgerufen von: <https://www.topagrar.com/energie/news/deutschlands-erste-lng-tankstelle-fuer-lkw-9366860.html>

RAG Austria. (o. D.). *LNG-Tankstelle Ennshafen*. Abgerufen von: <https://www.rag-erdgas-mobil.at/tankstellen/lng-tankstelle-ennshafen.html>

RP Digital. (o. D.). *Erdgastankstellen in Deutschland und Europa*. Abgerufen von: <https://rp-online.de/leben/auto/alternative-antriebe/erdgas/erdgastankstellen-in-deutschland-und->



europa-wichtige-informationen_aid-

18791353#:~:text=Hier%20kommen%20Antworten%20auf%20die%20f%C3%BCnf%20wichtigsten%20Fragen%20rund%20um%20Erdgastankstellen.&text=Kaum%20eine%20Region%20in%20Deutschland,Erdgastankstellen%20mit%20CNG%2DVersorgung.

Schwander, A. (2020, 19. November). *Lastwagen geben Gas*. Strom-online. Abgerufen von: <https://strom-online.ch/lastwagen-geben-gas/>

Shell Deutschland Oil. (2020, 16. Oktober). *Shell nimmt zwei neue LNG-Tankstellen in Betrieb und vergibt Auftrag für Bau der Gas-Verflüssigungsanlage*. Abgerufen von: <https://www.shell.de/medien/shell-presseinformationen/2020/shell-nimmt-zwei-neue-lng-tankstellen-in-betrieb-und-vergibt-auftrag-fuer-bau-der-gas-verfluessigungsanlage.html>

Swiss Camion. (2018, 3. September). *Swiss Camion - Drei LNG-Tankstellen bis im Frühling - Die Strassentransportfachzeitschrift der Schweiz*. Abgerufen von: <https://www.swisscamion.ch/article/drei-lng-tankstellen-bis-im-fruehling/#:~:text=Drei%20Tankstellen%20f%C3%BCr%20fl%C3%BCssiges%20Erdgas,n%C3%A4chstem%20Fr%C3%BChling%20in%20Betrieb%20sein.&text=Wie%20wir%20schon%20Anfang%20Jahr,die%20Umweltbelastung%20durch%20das%20Transportwesen.>

Uniper. (2020, 24. April). *Liqvis eröffnet neue LNG-Tankstelle in Kassel an der A7*. Abgerufen von: <https://www.uniper.energy/news/liqvis-eroeffnet-neue-lng-tankstelle-in-kassel-an-der-a7/>

Zukunft Gas. (o. D.-a). *LNG: Die Alternative zu Diesel*. Abgerufen von: <https://www.erdgas.info/erdgas-mobil/alternative-kraftstoffe/lng-als-kraftstoff/>

Zukunft Gas. (o. D.-b). *LNG-Terminal für Deutschland*. Abgerufen von: <https://www.gas.info/klimaschutz-mit-gas/mobilitaet-der-zukunft/lng-verfluessigtes-erdgas/lng-terminal>

Zukunft Gas. (2017, Juli). *Allgemeine Fragen*. Abgerufen von: <https://www.mainkinziggas.de/wp-content/uploads/2017/07/FAQ-Erdgasmobiliaet.pdf>



Tankstellen H2

Arlt, W. & Obermeier, J. (2017, Juli). *Machbarkeitsstudie. Wasserstoff und Speicherung im Schwerlastverkehr*. Abgerufen von:
https://www.encn.de/fileadmin/user_upload/Studie_Wasserstoff_und_Schwerlastverkehr_WEB.pdf

Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie. (o. D.). *Bayerische Wasserstoffstrategie*. Abgerufen von:
<https://www.stmwi.bayern.de/wasserstoffstrategie/>

Ehret, O. (2020). *Wasserstoffmobilität: Stand, Trends, Perspektiven - Kurzfassung*. Abgerufen von:
https://www.researchgate.net/publication/340444315_Wasserstoffmobilitat_Stand_Trends_Perspektiven_-_Langfassung

Förderverein H2 Mobilität Schweiz. (o. D.). *Elektro-Mobilität im geschlossenen Wasserkreislauf*. Abgerufen von: <https://h2mobilitaet.ch/h2-mobilitaet/>

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme. (2020, 18. März). *Fraunhofer-Gesellschaft erstellt Wasserstoff-Roadmap für Deutschland*. Abgerufen von:
<https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2020/fraunhofer-wasserstoff-roadmap.html>

Resato International. (o. D.). *H2Refuel Full Sized Station*. Abgerufen von:
<https://www.resato.com/de/wasserstoff-technologie/fss>

Shell Deutschland Oil. (o. D.). *Shell Wasserstoffstudie*. Abgerufen von:
<https://www.shell.de/medien/shell-publikationen/shell-hydrogen-study.html>

Platooning

ADAC. (2019, 31. Januar). *Pilotprojekt Platooning: Lkw fahren in Kolonne*. Abgerufen von:
<https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/ausstattung-technik-zubehoer/autonomes-fahren/technik-vernetzung/platooning-lkw-automatisiert/>



Axelsson, J., Bergh, T., Johansson, A., Mårdberg, B., Svenson, P. & Åkesson, V. (2020, Juli). *Truck Platooning Business Case Analysis*. Abgerufen von: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1410842/FULLTEXT01.pdf>

Becker, J. (2019, 21. Mai). *Autonomes Fahren - Platooning bringt gar nicht so viel*. Süddeutsche. Abgerufen von: <https://www.sueddeutsche.de/auto/autonomes-fahren-platooning-test-1.4444322>

Bundesamt für Strassen. (2017, August). *Chancen und Risiken des Einsatzes von Abstandshaltesystemen sowie des Platoonings von Strassenfahrzeugen - Machbarkeitsanalyse*. Abgerufen von: https://www.astra.admin.ch/dam/astra/de/dokumente/abteilung_strassennetzeallgemein/bericht_platooning.pdf.download.pdf/170811_ASTRA_Platooning_Bericht_V5.0.pdf

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. (o. D.). *Elektronische Deichsel – Digitale Innovation – EDDI*. Abgerufen von: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/AVF-projekte/eddi.html>

Emobilitaet.online. (2019, 8. Januar). *CES: Daimler Trucks investiert in hochautomatisierte Brummis*. Abgerufen von: <https://emobilitaet.online/news/wirtschaft/5184-daimler-trucks-automatisierte-lkw-platooning>

Fuchs, M. (2019, 26. Juli). *Der Platooning-Demonstrator ist fertig! »Fahrzeug + Karosserie«*. Abgerufen von: <https://www.fahrzeug-karosserie.de/der-platooning-demonstrator-ist-fertig-a-850293/>

Gillies, C. (2019, 25. März). *Lkw-Platooning: Immer schön der Reihe nach*. Abgerufen von: Transformation Beats. <https://www.transformationbeats.com/de/digitalisierung/lkw-platooning/>

Hafenzeitung. (2020). *HHLA und MAN starten „Hamburg Truckpilot“*. Abgerufen von: <https://hafenzeitung.de/hhla-und-man-starten-hamburg-truckpilot?print=pdf>

Lammert, M., McAuliffe, B., Smith, P., Raesi, A., Hoffman, M. & Bevely, D. (2020, 5. Januar). *Impact of Lateral Alignment on the Energy Savings of a Truck Platoon*. (No. 2020-01-0594). SAE Technical Paper. <https://doi.org/10.4271/2020-01-0594>



Muratori, M., Holden, J., Lammert, M., Duran, A., Young, S. & Gonder, J. (2017, 15. März). *Potentials for Platooning in U.S. Highway Freight Transport*. (Vol. 10, No. NREL/CP-5400-67618). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States). <https://doi.org/10.4271/2017-01-0086>

Reus, J. (2018, 16. Februar). *Platooning im Praxistest: DB Schenker erhält Pilotfahrzeuge von MAN*. DB Schenker. Abgerufen von: <https://logistik-aktuell.com/2018/02/16/platooning-im-praxistest-db-schenker-man/>

Tsukuba, S., Jeschke, S. & Shladover, S. (2016, 22. Juni). *A Review of Truck Platooning Projects for Energy Savings*. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 1(1), 68-77. <https://doi.org/10.1109/TIV.2016.2577499>

Autonomes Fahren

ADAC. (2020, 24. Februar). *So funktioniert ein automatisiertes Auto*. Abgerufen von: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/ausstattung-technik-zubehoer/autonomes-fahren/grundlagen/auto-automatisiert-funktion/>

Auto Gewerbe Verband Schweiz. (2019, 4. November). *Autonome Autos sollen ab 2025 marktreif werden*. Abgerufen von: <https://www.agvs-upsa.ch/de/news/news-archiv/autonome-autos-sollen-ab-2025-marktreif-werden>

BMW. (2020, 21. Oktober). *5 Stufen zum selbstfahrenden Auto*. Abgerufen von: <https://www.bmw.com/de/automotive-life/autonomes-fahren.html>

Brien, J. (2020, 13. März). *Mercedes-Benz setzt auf autonome Lkw statt auf selbstfahrende Autos*. t3n Magazin. Abgerufen von: <https://t3n.de/news/mercedes-benz-setzt-autonome-lkw-1261352/>

Crunchbase. (o. D.). *Embark Trucks - Company Profile & Funding*. Abgerufen von: <https://www.crunchbase.com/organization/embark-trucks>

Daimler. (2019, 9. Dezember). *Daimler und Bosch. Start des San José Pilotprojektes für automatisierten Mitfahrerservice*. Abgerufen von: <https://www.daimler.com/innovation/case/autonomous/pilotstadt-san-jose.html>



- Daimler. (2020, 27. Oktober). *Trucks and Waymo partner on the development of autonomous SAE Level 4 trucks*. Abgerufen von: <https://www.daimler.com/investors/reports-news/financial-news/20201027-dt-and-waymo.html>
- Deloitte. (2019, September). *Urbane Mobilität und autonomes Fahren im Jahr 2035*. Abgerufen von: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/de/Documents/Innovation/datenland-deutschland-autonomes-fahren.pdf>
- Doll, N. (2016, 5. Dezember). *Auto der Zukunft: Der Mensch wird der Technik ausgeliefert sein*. DIE WELT. Abgerufen von: <https://www.welt.de/wirtschaft/article159999932/Die-gespenstischen-Visionen-vom-fuehrerlosen-Fahren.html>
- EHS Today. (2018, 20. Februar). *Could Self-Driving Trucks Make Roads Safer?* Abgerufen von: <https://www.ehstoday.com/safety-technology/article/21919510/could-selfdriving-trucks-make-roads-safer>
- Geiger, J. (2018, 30. Oktober). *Stufe für Stufe*. Eurotransport. Abgerufen von: <https://www.eurotransport.de/artikel/autonome-nutzfahrzeuge-stufe-fuer-stufe-10486460.html>
- Gelowicz, S. & Scheffels, G. (2018, 20. Dezember). *Autonomes Fahren: Definition, Level & Grundlagen*. Automobil Industrie. Abgerufen von: <https://www.automobil-industrie.vogel.de/autonomes-fahren-definition-level-grundlagen-a-786184/#:%7E:text=Autonomes%20Fahren%20soll%20die%20Mobilit%C3%A4t,ist%20eines%20der%20gro%C3%9Fen%20Zukunftsthemen.&text=Der%20Weg%20dorthin%20wird%20als,bzw.%20in%20diese%20Systeme%20eingreifen.>
- Hawkins, A. J. (2020, 8. Oktober). *Drone truck startup Einride unveils new driverless vehicles for autonomous freight hauling*. The Verge. Abgerufen von: <https://www.theverge.com/2020/10/8/21506125/einride-self-driving-truck-pod-aet-reveal>
- Hitch, J. (2020, 24. September). *Is TuSimple about to solve complexities of driverless trucks?* FleetOwner. Abgerufen von: <https://www.fleetowner.com/technology/autonomous-vehicles/article/21142760/is-tusimple-about-to-solve-complexities-of-driverless-trucks>



Krail, M., Hellekes, J., Schneider, U., Dütschke, E., Schellert, M., Rüdiger, D., Steindl, A., Luchmann, I., Waßmuth, V., Flämig, H., Schade, W. & Mader, S. (2019, Januar). *Energie-und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr*. Abgerufen von:

<https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/ccn/2019/energie-treibhausgaswirkungen-vernetztes-fahren.pdf>

Mercedes-Benz. (o. D.). *Wie autonomes Fahren gelingt – Ein Pilotprojekt von Daimler und Bosch*. Abgerufen von: <https://www.mercedes-benz.com/de/innovation/autonomous/wie-autonomes-fahren-gelingt-ein-pilotprojekt-von-daimler-und-bosch/>

Nowak, G., Maluck, J., Stürmer, C. & Pasemann, J. (2016). *The era of digitized trucking - Transforming the logistics value chain*. Abgerufen von: <https://www.strategyand.pwc.com/gx/en/insights/2016/the-era-of-digitized-trucking/the-era-of-digitized-trucking-transforming.pdf>

N-TV Nachrichtenfernsehen. (2018, 13. September). *Digitalisierung der Logistik: Autonome Lkw könnten Kosten halbieren*. Abgerufen von: <https://www.n-tv.de/wirtschaft/Autonome-Lkw-koennten-Kosten-halbieren-article20621184.html#:~:text=Indes%20fielen%20f%C3%BCr%20die%20Technologien,um%20etwa%20sieben%20Prozent%20sinken.>

Rhode, S. (2020, 26. Juni). *Autonomes Fahren*. Check24. Abgerufen von: <https://www.check24.de/kfz-versicherung/autonomes-fahren/>

TuSimple. (2020, 6. Dezember). In *EverybodyWiki*. Abgerufen von: <https://en.everybodywiki.com/TuSimple>

TÜV Nord. (2019, 24. Dezember). *Die Stufen des autonomen Fahrens*. Abgerufen von: <https://www.tuev-nord.de/explore/de/erklaert/die-stufen-des-autonomen-fahrens/>

VDI Verlag. (2020, 11. März). *Daimler fokussiert sich auf selbstfahrende Lkw*. Abgerufen von: <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/verkehr/daimler-selbstfahrende-lkw-deutschen-autobahnen-testen/>



Assistenzsysteme

ADAC. (2020, 1. Januar). *Fahrerassistenzsysteme: So werden Autofahrer entlastet.*

Abgerufen von: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/ausstattung-technik-zubehoer/assistenzsysteme/fahrerassistenzsysteme/#:%7E:text=Der%20ADAC%20erk1%C3%A4rt%2C%20wie%20die,und%20machen%20das%20Autofahren%20sicherer.>

Automobilwoche. (2015, 10. Juli). *Kosten des autonomen Fahrens: Preis der Technik wird sinken.* Crain Communications GmbH. Abgerufen von:

<https://www.automobilwoche.de/article/20150710/AGENTURMELDUNGEN/307109930/kosten-des-autonomen-fahrens-preis-der-technik-wird-sinken#:%7E:text=%22Parkassistenten%20kosten%20heute%20zwischen%2030,300%20und%20400%20Euro%20verkauft.>

Automotive Fleet Magazine. (2018, 25. Oktober). *Advanced Safety Systems Cost Twice as Much to Repair.* Abgerufen von: <https://www.automotive-fleet.com/317683/advanced-safety-systems-cost-twice-as-much-to-repair>

Deutscher Bundestag. (2016). *Vermeidung von LKW-Auffahrunfällen auf Bundesautobahnen durchNotbremssysteme.* Abgerufen von:

<https://www.bundestag.de/resource/blob/477598/fe909742f0b8e21a7a43d69eddd888cb/WD-5-069-16-pdf-data.pdf>

Deutscher Verkehrssicherheitsrat. (2006, September). *Fahrerassistenzsysteme – Innovationen im Dienste der Sicherheit.* 12 . DVR-Forum Sicherheit und Mobilität, München, Deutschland.

Deutscher Verkehrssicherheitsrat. (2018). *Verbreitung von Fahrerassistenzsystemen nimmt zu.* Bester Beifahrer. Abgerufen von:

<https://www.bundestag.de/resource/blob/477598/fe909742f0b8e21a7a43d69eddd888cb/WD-5-069-16-pdf-data.pdf>

Elyasi-Pour, R. (2015). *Simulation Based Evaluation of Advanced Driver Assistance Systems.*

Abgerufen von: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:872056/FULLTEXT03.pdf>



Huelsebusch, D. (2018). *Fahrerassistenzsysteme zur energieeffizienten Laengsregelung - Analyse und Optimierung der Fahrsicherheit*. Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Mein Autolexikon. (o. D.). *Fahrerassistenzsysteme*. Abgerufen von: <https://www.mein-autolexikon.de/fahrerassistenzsysteme.html>

Mobilitätsmagazin. (2021, 14. Februar). *Antiblockiersystem (ABS): Vor- und Nachteile dieser Technik*. Abgerufen von: <https://www.bussgeldkatalog.org/abs/>

Robert Bosch GmbH. (o. D.). *Fahrerassistenzsysteme – für mehr Sicherheit im Lastverkehr*. Abgerufen von: <https://www.bosch-mobility-solutions.com/de/highlights/automatisierte-mobilit%C3%A4t/fahrerassistenzsysteme-f%C3%BCr-nutzfahrzeuge/>

Wildemann, K. (2020, 28. Januar). *Level 2+: Intelligente Fahrerassistenzsysteme*. ZF Friedrichshafen AG. Abgerufen von: https://www.zf.com/mobile/de/stories_26496.html

Telematiksysteme

Baumgartner, M. & Léonardi, J. (2004). Optimierte Disposition und Telematiksteigern Effizienz im deutschen SGV. *Internationales Verkehrswesen*. Abgerufen von: <https://mpimet.mpg.de/fileadmin/projekte/nestor/BaumgartnerLeonardi-DispositionTelematik-IntVerkehrswesen5-2004.pdf>

Daimler FleetBoard. (2016a). *Fleetboard Unternehmensbroschüre*. Abgerufen von: https://www.fleetboard.info/fileadmin/content/international/Brochures/2016/EN_Full-Brochure.pdf

Daimler FleetBoard. (2016b). *Fleetboard vehicle management*. Abgerufen von: <https://tools.mercedes-benz.co.uk/current/trucks/brochures/fleetboard/fleetboard-vehicle-management.pdf>

Dataforce. (2018, 11. Juni). *Telematikanalyse: Fast die Hälfte aller großen Flotten mittlerweile mit Fahrzeugtelematik ausgestattet*. Abgerufen von:



<https://www.dataforce.de/news/dataforce-telematikanalyse-fast-die-haelfte-aller-grossen-flotten-mittlerweile-mit-fahrzeugtelematik-ausgestattet/>

Fahrzeugortung.com. (2016, 15. Februar). *Telematiksystem – Preise und Funktionen im Überblick*. Fahrzeugortung & Flottenmanagement im Griff. Abgerufen von: <https://www.fahrzeugortung.com/telematiksystem-preise-und-funktionen-im-ueberblick>

Industrie- und Handelskammer Region Stuttgart (Hrsg.). (2011, November). *Praxisleitfaden zur IHK-Studie „Grüne Logistik“*. Abgerufen von: <https://www.stuttgart.ihk24.de/blueprint/servlet/resource/blob/669370/2c424c9ef518e6ff3003cdd7729bd562/praxisleitfaden-gruene-logistik-data.pdf>

Kuther, T. (2010, 22. Januar). *Studie sieht grüne Telematik als einfache Lösung für weniger Emissionen und mehr Treibstoffeffizienz*. Elektronik Praxis. Abgerufen von: <https://www.elektronikpraxis.vogel.de/studie-sieht-gruene-telematik-als-einfache-loesung-fuer-weniger-emissionen-und-mehr-treibstoffeffizienz-a-246927/>

Lackes, R., Siepermann, M. & Krieger, W. (2018, 19. Februar). *Telematik*. Gabler Wirtschaftslexikon. Abgerufen von: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/telematik-49843>

Telematik-Markt. (o. D.). *Daimler FleetBoard*. Abgerufen von: <https://telematik-markt.de/toplist/daimler-fleetboard-gmbh>

Wassmann, Y. (2017). *Digitalisierung der Transport-und Logistikbranche-Chancen und Risiken von Telematikanwendungen im Flottenmanagement*. Abgerufen von: <https://core.ac.uk/download/pdf/93206573.pdf>

Webfleet Solutions. (o. D.-a). *Sparrechner für Flotten*. Abgerufen von: https://www.webfleet.com/de_ch/webfleet/savings-calculator/

Webfleet Solutions. (o. D.-b). *WEBFLEET*. Abgerufen von: https://www.webfleet.com/de_ch/webfleet/



Ladeinfrastruktur E-Flotte

ABB Asea Brown Boveri. (o. D.). *Hochleistungs-Ladestationen*. Abgerufen von:

<https://new.abb.com/ev-charging/de-ch/produkte/car-charging/hochleistungs-ladestationen>

Bundesverband der Energie und Wasserwirtschaft, Deutsche Kommission Elektrotechnik

Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE, Zentralverband der Deutschen

Elektro- und Informationstechnischen Handwerke & Zentralverband Elektrotechnik-

und Elektronikindustrie. (2020, Januar). *Der Technische Leitfaden Ladeinfrastruktur*

Elektromobilität. Abgerufen von:

<https://www.vde.com/resource/blob/988408/ca81c83d2549a5e89a4f63bbd29e80c6/technischer-leitfaden-ladeinfrastruktur-elektromobilitaet---version-3-1-data.pdf>

Ecomento. (o. D.). *Das ABC des Elektroauto-Ladens: Fakten & Wissenswertes*. Abgerufen

von: <https://ecomento.de/ratgeber/elektroauto-laden-in-5-minuten-zum-fachmann/>

Hacker, F., von Waldenfels, R. & Mottschall, M. (2015, April). *Wirtschaftlichkeit von*

Elektromobilität in gewerblichen Anwendungen. Abgerufen von:

<https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Gesamtbericht-Wirtschaftlichkeit-von-Elektromobilitaet.pdf>

Kühnel, S., Hacker, F. & Görz, W. (2018, September). *Oberleitungs-Lkw im Kontextweiterer*

Antriebs- und Energieversorgungsoptionen für den Straßengüterfernverkehr. Öko-

Institut. Abgerufen von: [https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2018-](https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2018-09/Teilbericht%201%20O-Lkw-Technologievergleich-2018.pdf)

[09/Teilbericht%201%20O-Lkw-Technologievergleich-2018.pdf](https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2018-09/Teilbericht%201%20O-Lkw-Technologievergleich-2018.pdf)

Nicholas, M. (2019, August). *Estimating electric vehicle charging infrastructure costs across major U.S. metropolitan areas*. Abgerufen von:

https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_EV_Charging_Cost_20190813.pdf

Plötz, P., Speth, D. & Rose, P. (2020, Mai). *Hochleistungsschnellladenetz für Elektro-Lkw*.

Abgerufen von: http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-6086668.pdf

Protoscar. (2019, Dezember). *Ratgeber für die Installation von Ladesystemen für eFahrzeuge*.

Abgerufen von: <https://www.emobility->



schweiz.ch/download/Ratgeber_f%C3%BCr_die_Installation_von_Ladesystemen_f%C3%BCr_eFahrzeuge_2020.pdf

Schaal, S. (2020a, Mai 11). *ABB erhält Auftrag für E-Lkw-Lader aus Norwegen*. Electrive. Abgerufen von: <https://www.electrive.net/2020/05/11/abb-erhaelt-auftrag-fuer-e-lkw-lader-aus-norwegen/>

Schaal, S. (2020b, Oktober 26). *Plant Tesla V4-Supercharger mit bis zu 350 kW?* Electrive. Abgerufen von: <https://www.electrive.net/2020/10/26/plant-tesla-v4-supercharger-mit-bis-zu-350-kw/>

Werwitzke, C. (2020, 4. April). *ACEA fordert 90.000 öffentliche Ladepunkte für Lkw bis 2030*. Electrive. Abgerufen von: <https://www.electrive.net/2020/04/04/acea-fordert-90-000-oeffentliche-ladepunkte-fuer-lkw-bis-2030/>

Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie. (2013, Dezember). *Spannungsklassen in der Elektromobilität*. Abgerufen von: https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2014/januar/Spannungsklassen_in_der_Elektromobilitaet/Spannungsklassen-Elektromobilitaet.pdf

KI-Routenführung

Bitkom. (o. D.). *KI wird in Unternehmen viel seltener genutzt als gedacht*. Abgerufen von: <https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/KI-wird-in-Unternehmen-viel-seltener-genutzt-als-gedacht>

ComputerWeekly. (o. D.). *Künstliche Intelligenz (KI)*. Abgerufen von: <https://www.computerweekly.com/de/definition/Kuenstliche-Intelligenz-KI>

Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen. (o. D.). *KITE: Künstliche Intelligenz im Transport zur Emissionsreduktion*. Abgerufen von: <https://www.scs.fraunhofer.de/de/referenzen/kite.html>

Hanseatische Software-Entwicklungs- und Consulting GmbH. (o. D.). *KI für die Disposition*. Abgerufen von: <https://hec.de/referenzen/logistik/ki-fuer-die-disposition/>



- Hao, K. (2019, 6. Juni). *Training a single AI model can emit as much carbon as five cars in their lifetimes*. MIT Technology Review. Abgerufen von: <https://www.technologyreview.com/2019/06/06/239031/training-a-single-ai-model-can-emit-as-much-carbon-as-five-cars-in-their-lifetimes/>
- Hecker, D., Döbel, I., Petersen, U., Rauschert, A., Schmitz, V. & Voss, A. (2017). *Zukunftsmarkt künstliche Intelligenz*. Abgerufen von: https://www.bigdata-ai.fraunhofer.de/content/dam/bigdata/de/documents/Publikationen/KI-Potenzialanalyse_2017.pdf
- Industrial AI. (2020, 27. März). *Erste marktreife KI-Anwendung für Lackierereien*. Abgerufen von: <https://www.ind-ai.net/kuenstliche-intelligenz-in-der-robotik/erste-marktreife-ki-anwendung-fuer-lackierereien/2/>
- Klukas, A., Eiband, A., Fieberg, D., Bochynek, C. & Gastrich, N. (2019). *Praxisleitfaden für den kombinierten Verkehr*. Abgerufen von: https://sgkv.de/wp-content/uploads/2020/07/INTERAKTIV_ERFA-Praxisleitfaden_191212-1.pdf
- Scherf, J. & Dörfelt, S. (2018, 6. März). *Leerkilometer und Leerfahrten - Wie man sie reduziert und vermeidet*. MM Logistik. Abgerufen von: <https://www.mm-logistik.vogel.de/leerkilometer-und-leerfahrten-wie-man-sie-reduziert-und-vermeidet-a-673353/>
- Schürmann Rosenthal Dreyer Rechtsanwälte. (2020, 28. Januar). *Künstliche Intelligenz & Ethik: zwischen Potenzial und Risiken*. Abgerufen von: <https://www.srd-rechtsanwaelte.de/blog/kuenstliche-intelligenz-ethik/>
- Spielmann, M., Faltenbacher, M., Eichhorn, D. & Stoffregen, A. (2011, September). *Energiebedarfs- und Emissionsvergleich von LKW und Bahn im Güterfernverkehr*. Abgerufen von: <https://www.vda.de/de/services/Publikationen/energiebedarfs--und-emissionsvergleich-von-lkw-und-bahn-im-g-ter.html>

Fahrertrainings

- DAF Trucks. (o. D.). *DAF Fahrertraining*. Abgerufen von: <https://www.daf.ch/de-ch/daf-services/daf-fahrerservices/daf-driver-academy>



DEKRA Akademie. (o. D.). *Training im DEKRA Fahrsimulator*. Abgerufen von:

<https://www.dekra-akademie.de/de/fahrsicherheitstraining-lkw/>

DVZ (2020). *Fahrsimulator für mehr Sicherheit*. Abgerufen von:

<https://www.dvz.de/rubriken/land/detail/news/fahrsimulator-fuer-mehr-sicherheit.html>

FOCUS Online. (2020, 17. Juli). *Neues Fahrtraining auch für Elektroautos: Im Hyundai auf die Schulbank*. Abgerufen von: https://www.focus.de/auto/news/neues-fahrtraining-auch-fuer-elektroautos-im-hyundai-auf-die-schulbank_id_12221456.html

MAN Truck & Bus Schweiz. (2008, September). *MAN Fuel Control*. Abgerufen von:

https://www.truck.man.eu/man/media/content_medien/doc/business_websites_suisse_1/service_vertraege_1/service_vertraege/MAN_Fuel_Control_DE.pdf

Rosenberger, T. (2013, 18. Juli). *Der Fahrer hat's im Fuß*. Eurotransport. Abgerufen von:

<https://www.eurotransport.de/artikel/nachhaltiger-transport-der-fahrer-hat-s-im-fuss-6497136.html>

Scania Deutschland. (o. D.). *Fahrer Coaching*. Abgerufen von:

<https://www.scania.com/de/de/home/products-and-services/driver-services/coaching.html>

Touring Club Schweiz. (o. D.). *Passenden Kurs finden*. Abgerufen von:

<https://www.tcs.ch/de/kurse-fahrzeugchecks/kurse-fahrtrainings/lkw-bus/>

Lastenräder

Abidi, H., Hohm, S. & Weber, C. (2021). *DACHSER Emission-Free Delivery: Nachhaltige City-Logistik in der Stuttgarter Innenstadt*. In: Siebenpfeiffer W. (eds) *Mobilität der Zukunft*. ATZ/MTZ-Fachbuch. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg.
https://doi.org/10.1007/978-3-662-61352-8_34

Association des Constructeurs Européens d'Automobiles. (2020, 23. Januar). *Commercial vehicle registrations: +2.5% full-year 2019; +5.7% in December*. Abgerufen von: <https://www.acea.be/press-releases/article/commercial-vehicle-registrations-2.5-full-year-2019-5.7-in-december>



Beckendorff, J. (2020, 28. Juli). *Tern-Cargo übertrifft neue Lastenrad-Norm mit EFBE-Tri-Test*. RadMarkt. Abgerufen von: <https://radmarkt.de/nachrichten/tern-cargobikes-uebertrifft-neue-lastenrad-norm-efbe-tri-test>

Cargobike.jetzt. (o. D.). *News, Tipps & Projekte rund um's Lastenrad*. Abgerufen von: <https://www.cargobike.jetzt/>

Deutsches Institut für Normung. (2019, 19. Dezember). *Neue Norm zu Lastenfahrrädern veröffentlicht*. Abgerufen von: <https://www.din.de/de/ueber-normen-und-standards/nutzen-fuer-den-verbraucher/verbraucherrat/ueber-uns/neue-norm-zu-lastenfahrraedern-veroeffentlicht-698676>

Gruber, J. (2015, Januar). *Ich ersetze ein Auto*. Abgerufen von: https://www.lastenradtest.de/wordpress/wp-content/uploads/2017/07/Ich-ersetze-ein-Auto_Schlussbericht.pdf

Onomotion. (o. D.). *ONO | Startseite*. Abgerufen von: <https://berlin.onomotion.com/>

Reichel, J. (2018, 30. November). *DLR-Projekt: Cargobikes könnten den Verkehr stark entlasten*. LOGISTRA. Abgerufen von: <https://logistra.de/news/nfz-fuhrpark-lagerlogistik-intralogistik-dlr-projekt-cargobikes-koennten-den-verkehr-stark-entlasten-15083.html>

Reichel, J. (2019, 30. Juli). *E-Lastenrad: ONO geht in Feldtest bei Hermes und Liefery*. LOGISTRA. Abgerufen von: <https://logistra.de/news/nfz-fuhrpark-lagerlogistik-intralogistik-e-lastenrad-ono-geht-feldtest-bei-hermes-und-liefery-16331.html>

Reidl, A. (2019, 22. Juli). *Neue Schlepper für die letzte Meile*. RiffReporter. Abgerufen von: <https://www.riffreporter.de/de/gesellschaft/busystreets>

Sortimo International. (o. D.). *ProCargo CT1 - Das leichteste und umweltfreundlichste Nutzfahrzeug!* Abgerufen von: <https://www.mysortimo.de/de/produkte/lastenfahrrad-procargo-ct1>

Stadt Bern. (2017, 27. Januar). *«Mir sattlä um!»: Positive Bilanz zum Einsatz von eCargobikes*. Abgerufen von:



https://www.bern.ch/mediencenter/medienmitteilungen/aktuell_ptk/mir-sattlae-um-positive-bilanz-zum-einsatz-von-ecargobikes

Styles, J. (2018, 11. Dezember). *E-cargo bike saves money, reduces delivery times and cuts CO2 & particulate emissions for London business*. Cycling Industry News. Abgerufen von: <https://cyclingindustry.news/e-bike-power-saves-money-reduces-delivery-times-and-cuts-co2-particulate-emissions-for-london-business/>

Velototal. (2020, 6. Juli). *Cargobike-Marktumsfrage zeigt über 50% Wachstum in Europa*. Abgerufen von: <https://www.velototal.de/2020/07/06/cargobike-marktumfrage-zeigt-%C3%BCber-50-wachstum-in-europa/>

Zeitler, M. (2018, 27. November). „*Mikrodepots und Lastenräder könnten 30 Prozent der Sendungen übernehmen*“. Hermes Germany GmbH. Abgerufen von: <https://newsroom.hermesworld.com/citylogistik-mikrodepots-und-lastenraeder-koennten-30-prozent-der-sendungen-uebernehmen-16429/>

Kombinierter Verkehr

Abidi, H., Hohm, S. & Weber, C. (2021). *DACHSER Emission-Free Delivery: Nachhaltige City-Logistik in der Stuttgarter Innenstadt*. In: Siebenpfeiffer W. (eds) *Mobilität der Zukunft*. ATZ/MTZ-Fachbuch. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-61352-8_34

Association des Constructeurs Européens d'Automobiles. (2020, 23. Januar). *Commercial vehicle registrations: +2.5% full-year 2019; +5.7% in December*. Abgerufen von: <https://www.acea.be/press-releases/article/commercial-vehicle-registrations-2.5-full-year-2019-5.7-in-december>

Beckendorff, J. (2020, 28. Juli). *Tern-Cargo übertrifft neue Lastenrad-Norm mit EFBE-Tri-Test*. RadMarkt. Abgerufen von: <https://radmarkt.de/nachrichten/tern-cargobikes-uebertrifft-neue-lastenrad-norm-efbe-tri-test>

Cargobike.jetzt. (o. D.-a). *Lastenrad Förderung: Gewusst wo!* Abgerufen von: <https://www.cargobike.jetzt/tipps/cargobike-kaufpraemien/>



Cargobike.jetzt. (o. D.-b). *News, Tipps & Projekte rund um 's Lastenrad*. Abgerufen von:
<https://www.cargobike.jetzt/>

Deutsches Institut für Normung. (2019, 19. Dezember). *Neue Norm zu Lastenfahrrädern veröffentlicht*. Abgerufen von: <https://www.din.de/de/ueber-normen-und-standards/nutzen-fuer-den-verbraucher/verbraucherrat/ueber-uns/neue-norm-zu-lastenfahrraedern-veroeffentlicht-698676>

Ehrenfeuchter, M. (2020). *Lastenräder – Das große Risiko?* Zedler. Abgerufen von:
<https://www.zedler.de/de/zedler-aktuell/medienberichte/sonstige/news-detail/lastenr%C3%A4der-das-gro%C3%9Fe-risiko.html>

Gruber, J. (2015, Januar). *Ich ersetze ein Auto*. Abgerufen von:
https://www.lastenradtest.de/wordpress/wp-content/uploads/2017/07/Ich-ersetze-ein-Auto_Schlussbericht.pdf

IFEU, SGKV (2002). *Vergleichende Analyse von Energieverbrauch und CO₂-Emissionen im Straßengüterverkehr und Kombiniertem Verkehr Straße/Schiene*. Abgerufen von:
<https://www.bgl-ev.de/images/daten/emissionen/vergleich.pdf>

Onomotion. (o. D.). *ONO | Startseite*. Abgerufen von: <https://berlin.onomotion.com/>

Reichel, J. (2018, 30. November). *DLR-Projekt: Cargobikes könnten den Verkehr stark entlasten*. LOGISTRA. Abgerufen von: <https://logistra.de/news/nfz-fuhrpark-lagerlogistik-intralogistik-dlr-projekt-cargobikes-koennten-den-verkehr-stark-entlasten-15083.html>

Reichel, J. (2019, 30. Juli). *E-Lastenrad: ONO geht in Feldtest bei Hermes und Liefery*. LOGISTRA. Abgerufen von: <https://logistra.de/news/nfz-fuhrpark-lagerlogistik-intralogistik-e-lastenrad-ono-geht-feldtest-bei-hermes-und-liefery-16331.html>

Reidl, A. (2019, 22. Juli). *Neue Schlepper für die letzte Meile*. RiffReporter. Abgerufen von:
<https://www.riffreporter.de/de/gesellschaft/busystreets>

Sortimo International. (o. D.). *ProCargo CT1 - Das leichteste und umweltfreundlichste Nutzfahrzeug!* Abgerufen am 14. Februar 2021, von
<https://www.mysortimo.de/de/produkte/lastenfahrrad-procargo-ct1>



- Stadt Bern. (2017, 27. Januar). «*Mir sattlä um!*»: *Positive Bilanz zum Einsatz von eCargobikes*. Abgerufen von:
https://www.bern.ch/mediencenter/medienmitteilungen/aktuell_ptk/mir-sattlae-um-positive-bilanz-zum-einsatz-von-ecargobikes
- Styles, J. (2018, 11. Dezember). *E-cargo bike saves money, reduces delivery times and cuts CO2 & particulate emissions for London business*. Cycling Industry News. Abgerufen von: <https://cyclingindustry.news/e-bike-power-saves-money-reduces-delivery-times-and-cuts-co2-particulate-emissions-for-london-business/>
- Velototal. (2020, 6. Juli). *Cargobike-Marktumfrage zeigt über 50% Wachstum in Europa*. Abgerufen von: <https://www.velototal.de/2020/07/06/cargobike-marktumfrage-zeigt-%C3%BCber-50-wachstum-in-europa/>
- Zeitler, M. (2018, 27. November). „*Mikrodepots und Lastenräder könnten 30 Prozent der Sendungen übernehmen*“. Hermes Germany GmbH. Abgerufen von:
<https://newsroom.hermesworld.com/citylogistik-mikrodepots-und-lastenraeder-koennten-30-prozent-der-sendungen-uebernehmen-16429/>

Truck Sharing

- Stölzle, W., & Wildhaber, V. B. (2019, März). Premises for Truck Sharing in General Cargo Cooperatives—an Exploratory Case Study Research. In *Interdisciplinary Conference on Production, Logistics and Traffic* (pp. 75-89). Springer, Cham.

LSS

- Nallinger, C. (2021, 21. Januar). *Uni St. Gallen mit Sharing-Konzept*. Eurotransport. Abgerufen von: <https://www.eurotransport.de/artikel/kooperation-cargo24-teilt-laderaum-uni-st-gallen-mit-sharing-konzept-stueckgut-schweiz-plattform-11177045.html>
- Wildhaber, V. (2020). Towards a Conceptual Framework for Loadspace Shipment Sharing.
- Wildhaber, V. (2021). Loadspace Shipment Sharing in Road Freight Communities. (unveröffentlichte Dissertation). Universität St.Gallen



Digitale Spedition

Behn, H. (2020, 16. Januar). *Shell investiert in Logistikunternehmen InstaFreight*. Logistik-Watchblog. Abgerufen von: <https://www.logistik-watchblog.de/unternehmen/2332-shell-investiert-logistikunternehmen-instafreight.html>

Cargonexx. (o. D.). *Cargonexx Transport Plattform*. Abgerufen von: <https://www.cargonexx.com/de>

Carrypicker. (o. D.). *Carrypicker - transport made smart*. Abgerufen von: <https://www.carrypicker.com/>

Dispo. (2018, 23. Oktober). *Digitale Spedition vs. CO2*. Abgerufen von: <https://dispo.cc/a/digitale-spedition-vs-co2>

InstaFreight. (o. D.). *InstaFreight - Ihr Logistikpartner für Landverkehr in Europa*. Abgerufen von: <https://www.instafreight.de>

Kille, C., Schulze, F., Schmidt, T., Stölzle, W. & Wildhaber, V. B. (2018). *Digitalisierungswerkzeuge in der Logistik: Einsatzpotenziale, Reifegrad und Wertbeitrag*. Cuvillier.

Login24. (2020, 17. September). *Digitalspedition sennder erwirbt europäisches Frachtgeschäft von Uber*. Abgerufen von: <https://login24.com/digitalspedition-sennder-erwirbt-europaeisches-frachtgeschaeft-von-uber/>

Schickler Unternehmensberatung. (2015, 12. Juli). *Cargonexx startet digitale Revolution im LKW-Transportmarkt*. Abgerufen von: <https://www.schickler.de/2015/07/erste-neugruendung-aus-schickler-inkubator-cargonexx-startet-digitale-revolution-im-lkw-transportmarkt/>

Seeble, P. (2019, 3. April). *Nachhaltige Beschaffung auf digitalen Plattformen am Beispiel logistischer Dienstleistungen – Analyse der Möglichkeiten für Einkäufer und Auswirkungen anhand der drei Dimensionen der Nachhaltigkeit*. In Nachhaltiges



Beschaffungsmanagement (pp. 371-387). Springer Gabler, Wiesbaden.

https://doi.org/10.1007/978-3-658-25188-8_21

Sennder. (o. D.). *Über uns* | *Sennder GmbH*. Abgerufen von:

<https://www.sennder.com/de/about-us>





