

Grüne Logistik: Eine Untersuchung ausgewählter alternativer Antriebstechnologien im Güterverkehr

VON PATRICK SIEGFRIED UND DANIEL STRAK

1 Einführung

Das effiziente Zusammenspiel zwischen ökonomischen und ökologischen Aspekten, auch als „grüne Logistik“ bezeichnet, rückt in den Fokus dieser Betrachtung. Die Ausprägung der grünen Logistik ist abhängig von den verschiedenen Anspruchsgruppen. So kann beispielsweise einerseits das Unternehmen selbst durch Initiativen grüne Logistik voranbringen, andererseits können Unternehmen durch Kunden in die Verantwortung genommen werden oder von der Politik konkrete Gesetze und Verordnungen auferlegt werden. Eine dieser Verordnungen sind die Dieselfahrverbote für Innenstädte. Die Verbote sind auf die Überschreitung der europaweit festgelegten Stickstoffdioxidgrenzwerte zurück zu führen.

Die Fahrverbote resultieren aus der Überschreitung von europaweit festgelegten Stickstoffdioxidgrenzwerten in den Innenstädten. Dieser wird als NO₂-Jahresmittelwert bezeichnet und wurde 1999 von den EU-Mitgliedstaaten beschlossen. Die Ursache für NO₂ in der Außenluft ist vorrangig auf Fahrzeuge mit Dieselantrieb im Straßenverkehr und im Straßengüterverkehr zurückzuführen.¹ Der gesamte städtische Wirtschaftsverkehr ist in deutschen und europäischen Städten stark ausgeprägt. Es wird davon ausgegangen, dass in europäischen Städten pro Woche zwischen 20.000 und 30.000 Anlieferungen und Abholungen pro km² erfolgen. Dabei entfallen etwa 30 bis 40 % der täglichen Anlieferungen auf den Einzelhandel.

Anschrift der Verfasser:

Prof. Dr. Patrick Siegfried
Professur Logistik & Supply Chain Management
ISM International School of Management GmbH –
Gemeinnützige Gesellschaft
Mörfelder Landstraße 55
60598 Frankfurt/Main
E-Mail: patrick.siegfried@ism.de

Daniel Strak
Professur Logistik & Supply Chain Management
ISM International School of Management GmbH –
Gemeinnützige Gesellschaft
Mörfelder Landstraße 55
60598 Frankfurt/Main
E-Mail: daniel.strak@ism.de

¹ vgl. Umwelt Bundesamt (2018 online).

Eine Belieferung dieser Betriebe erfolgt drei bis zehnmal pro Woche. Damit verursacht der Frachttransport in europäischen Städten etwa ein Drittel aller transportbezogenen Stickoxidemissionen.²

Neben der Möglichkeit der Optimierung des konventionellen Dieselantriebsstrangs unter Berücksichtigung der vereinbarten Reduktionsziele von Treibhausgasemissionen müssen neue Wege beschritten werden. Eine Reduktion kann zukünftig durch die Entwicklung alternativer Antriebe erreicht werden, um die ambitionierten Klimaziele der EU bzw. der Bundesregierung einhalten zu können.³ Demnach sollen die Emissionen um 20 % bis zum Jahr 2020 und darüber hinaus um weitere 40 % bis zum Jahr 2030 reduziert werden. Dabei beziehen sich die Vergleichszahlen auf das Basisjahr 1990. Letztlich sollen bis zum Jahr 2050 die jährlichen Treibhausgas (THG)- Emissionen, verglichen mit dem Jahr 1990 um 80 bis 95 % gesenkt werden.⁴

Ziel des vorliegenden Beitrags ist es daher, die Stärken und Schwächen sowie die daraus resultierenden Chancen und Risiken alternativer Antriebstechnologien aus ökonomischer und ökologischer Perspektive unter theoretischen und praktischen Gesichtspunkten gegenüberzustellen.

Dazu wurden insgesamt neun Experteninterviews durchgeführt. Die Stichprobenauswahl von neun Interviews ist zwar nicht repräsentativ, dennoch konnten fundierte Experten aus Unternehmen, Instituten und der Politik gewonnen werden. Dazu zählen ein Verkehrsexperte aus dem hessischen Landtag, der Geschäftsführer eines mittelständig geführten Logistikunternehmens, der Marketing-Verantwortliche eines führenden Herstellers an innovativen Antriebssystemen, der Experte eines führenden deutschen Institutes im Bereich Antriebssysteme sowie weitere Experten der größten deutschen Handelsunternehmen aus den Bereichen Logistik und Supply Chain Management. Die Experten wurden in einem persönlichen Interview bzw. Telefoninterview anhand eines Fragebogens befragt, der entsprechend den Experten modifiziert wurde.

Es stellt sich somit die Frage, ob und wenn ja, welche alternative Technologien sich gegenüber dem Dieselantrieb zukünftig im Straßengüterverkehr durchsetzen können.

² vgl. IHK (2013 online, S. 2f.).

³ vgl. Logistra (2018, S. 16-17).

⁴ vgl. BMU (o.J. online).

2 Antriebstechnologien im Güterverkehr

2.1 GÜTERVERKEHR UND ANTRIEBSTECHNOLOGIEN IN DEUTSCHLAND

2.1.1 Grüne Logistik

Unter grüner Logistik ist ein nachhaltiger und systematischer Prozess zu verstehen, der die Erfassung sowie Reduzierung der aus den Logistikprozessen resultierenden Emissionen zum Ziel hat. Damit steht das effiziente Zusammenspiel ökonomischer und ökologischer Aspekte im Fokus der Betrachtung.⁵ Die wesentlichen Anspruchsgruppen, deren Ziel es ist, die Entwicklung der grünen Logistik voranzutreiben bzw. Einfluss auf deren zukünftige Entwicklung zu nehmen, werden anhand der nachfolgenden Tabelle dargestellt und im Anschluss erläutert.

Anspruchsgruppen der grünen Logistik	
Anforderungen des Unternehmens <ul style="list-style-type: none"> - Kosteneinsparungen - Erzielen von Wettbewerbsvorteilen / Imagevorteilen - Ableitung einer Klimaschutzstrategie 	Anforderungen der Kunden <ul style="list-style-type: none"> - CO₂-Kennzeichnung von Waren - Unternehmens- und Umweltbilanzen - Zertifizierung von Umweltnormen
Anforderungen der Politik <ul style="list-style-type: none"> - Gesetze, Auflagen, Anreiz- und Sanktionsmaßnahmen - Logistik hat als CO₂-Verursacher eigenen Beitrag zu dessen Reduzierung zu leisten 	Anforderungen der Gesellschaft <ul style="list-style-type: none"> - Forderung nach mehr Unternehmensverantwortung – Corporate Social Responsibility (CSR)

Abbildung 1: Anspruchsgruppen an eine grüne Logistik⁶

Die Politik kann durch Gesetze, Verordnungen und anderen Auflagen unmittelbar Einfluss auf die Logistikdienstleister nehmen, um so eine nachhaltige ökologische Entwicklung voran zu treiben. Eine Maßnahme stellt in diesem Zusammenhang beispielsweise die Autobahnmaut dar. Des Weiteren kann ein Unternehmen durch Eigenmotivation und

⁵ vgl. Schulte (2017, S. 17).

⁶ Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an: Schulte (2017, S. 17) und Keuschen/ Klumpp (2011, S. 8).

Verantwortung bei der Entwicklung grüner Logistik mitwirken. Hierbei bilden die Mitarbeiter oftmals den Ausgangspunkt, indem sie in einem sozial und ökologisch geführten Unternehmen arbeiten möchten. Außerdem erhöht sich der Druck seitens der Gesellschaft auf Unternehmen und Logistikdienstleister, die ihrer gesellschaftlichen Unternehmensverantwortung nicht bzw. nur bedingt nachkommen. Letztlich stellen die Kunden eine wichtige Anspruchsgruppe dar, die von Lieferanten zunehmend Zertifizierungsnachweise zu Fragen des Umweltmanagements von Produkten und Dienstleistungen erwarten. Insgesamt ist daher davon auszugehen, dass grüne Logistik kein Modethema ist, sondern langfristig Einfluss auf die Wertschöpfung in Unternehmen bzw. der Logistik haben wird.⁷

2.1.2 Güterverkehr nach Verkehrsträgern

In Mitteleuropa wird der größte Teil des Güterverkehrs heute auf der Straße abgewickelt, was in der Vergangenheit nicht immer der Fall war. Erst in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts hat der Lastkraftwagen (LKW) in Deutschland die Eisenbahn als meist genutztes Verkehrsmittel abgelöst.⁸ Die Vorteile des Straßenverkehrs beruhen vorrangig auf einem gut ausgebauten Straßennetz.⁹ Gegenwärtig werden rund 71 % des Güterverkehrs in Deutschland über die Straße abgewickelt. Dies ist darauf zurück zu führen, dass sich durch vergleichsweise geringere Kosten der Güterverkehr mit LKWs gegenüber anderen Verkehrsträgern wie der Bahn oder der Binnenschifffahrt in vielen Anwendungsfällen, bezogen auf die Beförderungsleistung durchsetzen konnte. Darüber hinaus gibt es vielfältige Gründe, warum Speditionen auf den Einsatz von LKWs zur Güterbeförderung zurückgreifen. LKWs stehen für den Einsatz im Nah-, Regional- und Fernverkehr in ausreichender Zahl zur Verfügung. Die Touren können innerhalb weniger Stunden geplant und befahren werden und es stehen verschiedene Fahrzeugtypen für Standard- bzw. Spezialtransporte zur Verfügung.¹⁰ Zu Beginn des Jahres 2016 waren in Deutschland ca. 3 Mio. leichte und schwere Nutzfahrzeuge registriert.¹¹

Die weitaus größte Fahrzeugklasse stellen mit 2.3 Mio. Fahrzeugen bzw. 76 % die leichten Nutzfahrzeuge bis 3,5 t dar, gefolgt von 246.000 Fahrzeugen zwischen 3,5 und 7,5 t, was einem prozentualen Anteil von 8 % entspricht. Die Gewichtsklasse zwischen 7,5 und 12 Tonnen umfasst mit ca. 80.000 Fahrzeugen lediglich etwa 3 %. Der Fahrzeugbestand über 12 Tonnen liegt bei rund 200.000 Fahrzeugen. Zu dieser Gewichtsklasse zählen vorrangig

⁷ vgl. Keuschen / Klumpp (2011, S. 8).

⁸ vgl. zf-zukunftsstudie (2012 online).

⁹ vgl. Vry (2008, S. 72).

¹⁰ vgl. Wietschel et al. (2017, S. 217f.).

¹¹ vgl. Shell Nutzfahrzeug-Studie (2016 online, S. 23).

Motorwagen und Gliederzüge mit einem Anteil von 7 %. Die Kategorie der Sattelzugmaschinen umfasst ca. 200.000 Fahrzeuge mit einem Anteil von 6 %.¹²

2.1.3 Transportaufkommen und -leistung

Die Verkehrsleistung des LKWs belief sich im Jahr 2015 auf insgesamt 459 Mrd. tkm. Der LKW verfügt über eine hohe Flexibilität, denn von der Laderampe bis zur Haustür kann dieser fast jedes Ziel erreichen. Darüber hinaus ist er auch beim Transport kleinerer Sendungsgrößen im Nahverkehr einsetzbar, während beispielsweise die Eisenbahn erst ab einer Nutzlast von über 300 t als wirtschaftlich anzusehen ist. Der kombinierte Verkehr aus LKW und Eisenbahn ist darauf aufbauend erst ab einer Entfernung von über 500 km sinnvoll. Da sich jedoch fast 80 % des Güteraufkommens auf Strecken von rund 150 km beschränken, ist der LKW für Transporte mit geringen Volumen und auf kurzen Wegen ideal.¹³

Des Weiteren hat sich die seit 2011 andauernde überdurchschnittliche Entwicklung des Regionalverkehrs (51 bis 150 km) im Vergleich zum Fernverkehr (über 150 km) fortgesetzt. Dies ist vorrangig auf veränderte logistische Abläufe und auf den Aufbau von immer mehr Regionallägen anstelle von Zentrallägen zurückzuführen.¹⁴ Darüber hinaus geht die Verkehrsprognose 2030 vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur in seiner jüngsten Verkehrsprognose davon aus, dass im LKW-Segment die Verkehrsleistung mit rund 39 % den stärksten Zuwachs verzeichnen wird.¹⁵

Der Straßengüterverkehr verursacht einen großen Teil der Schadstoffemissionen im gesamten Straßenverkehr. Daher führte der Gesetzgeber bereits zu Beginn der 1990er Jahre Abgaswerte, die sogenannten Euro-Normen von 1 bis 6 für alle Fahrzeuge ein, mit dem Ziel, die lokalen Emissionen zu verringern. Die Euro-Normen setzten fahrleistungsabhängige Abgaswerte für Luftschadstoffe fest. Diese Klassifizierung ist nicht nur ein wichtiges fahrzeugtechnisches und ökologisches Unterscheidungsmerkmal, sondern stellt für den Fahrzeughalter darüber hinaus eine wirtschaftliche Relevanz. Nach den Klassen richtet sich die Höhe der Kraftfahrzeugsteuer, die Autobahnmaut sowie die Einfahrtberechtigung in entsprechende Umweltzonen.¹⁶

Darauf aufbauend gibt es für leichte Nutzfahrzeuge bis 3,5 t ab dem Jahr 2020 gesetzlich vorgeschriebene Emissionsgrenzwerte. Demnach dürfen in dieser Gewichtsklasse nicht mehr als 147 g/km CO₂ ausgestoßen werden, was in etwa einem Verbrauch von 5,6 l Diesel

¹² vgl. Shell Nutzfahrzeug-Studie (2016 online, S. 23).

¹³ vgl. VDA (o.J. online)

¹⁴ vgl. BAG (2018 online, S. 52f.)

¹⁵ vgl. BMVI (2014 online)

¹⁶ vgl. Shell Nutzfahrzeug-Studie (2016 online, S. 25f.)

auf 100 km entspricht. Im Vergleich dazu werden für schwere Nutzfahrzeuge verbindliche CO₂-Grenzwerte derzeit diskutiert.¹⁷ Da bei den schweren Nutzfahrzeugen die Antriebstechnik und damit die CO₂-Emissionen abhängig von der Anzahl der Achsen, den speziellen Aufbauten etc. sind, gestaltet sich die Messung sowie der Vergleich fahrzeugspezifischer CO₂-Emissionen als Herausforderung. Es bleibt daher abzuwarten, ob und wann es für schwere Nutzfahrzeuge vergleichbare Werte geben könnte.¹⁸

Bei den CO₂-Emissionen gilt es zwischen zwei Emissionsarten zu unterscheiden. So entstehen CO₂-Emissionen einerseits während der Herstellung bzw. der Bereitstellung der Kraftstoffe (Well-to-Tank = vom Bohrloch bis zum Rad) und andererseits bei der Nutzung (Tank-to-Wheel = vom Kraftstofftank bis zum Rad) des jeweiligen Kraftstoffes.¹⁹

2.1.4 Alternative Antriebe

Seit den 1920er Jahren wird der Lastkraftwagen von einem Verbrennungsmotor mit Dieseldieselkraftstoff angetrieben. Diesel besteht aus Mineralöl und stellt einerseits eine endliche Ressource dar und andererseits ist die Energieversorgung von einigen wenigen politisch unberechenbaren Lieferländern abhängig. Daher drängt sich die Frage nach Alternativen auf. Des Weiteren entstehen durch den Verbrennungsprozess Schadstoffe, die zwar bis heute aufgrund des technischen Fortschrittes reduziert werden konnten, dennoch ist es unvermeidbar, dass bei der Verbrennung von Diesel CO₂ entsteht.²⁰

Daher suchen Automobilhersteller nach neuen Wegen, um die Mobilität der Zukunft zu gestalten. Denn neben dem Aspekt der Abhängigkeit und Endlichkeit des Rohöls, leistet der CO₂-Ausstoß im Verkehrssektor einen erheblichen Beitrag zum Klimawandel. Deshalb werden seitens der Politik bzw. der Automobilhersteller die Einführung alternativ angetriebener Fahrzeuge fokussiert.²¹ Außerdem tragen die Kraftstoffkosten bei einer Jahresfahrleistung von etwa 100.000 km pro Jahr bis zu 30 % zu den Gesamtkosten bei und stellen damit neben den Personalkosten des Fahrers, den zweitgrößten Anteil an den gesamten Betriebskosten dar.²² In Zukunft ist zu erwarten, dass alternative Antriebe immer leistungsfähiger werden und durch günstigere Brennstoffe die Gesamtkosten der Transportwirtschaft insgesamt gesenkt werden können.²³

¹⁷ vgl. Amtsblatt der EU (2014 online)

¹⁸ vgl. Europäisches Parlament (2014 online, S. 4)

¹⁹ vgl. Wietschel et al (2017, S.140)

²⁰ vgl. Percy (2009, S. 3)

²¹ vgl. Wachter (2016, S. 1)

²² vgl. Wietschel (2017, S. 78f.)

²³ vgl. Global Truck Study (2016 online, S. 24)

Der LKW-Bestand, inklusive leichter Nutzfahrzeuge und Sattelzugmaschinen weist mit 95 % einen sehr hohen Anteil an Dieselantrieben auf. Somit ist der Dieselantrieb als Standardantrieb für Nutzfahrzeuge im Straßengüterverkehr zu sehen. Mit anderen Antriebsarten fahren nur etwa 4 % aller LKWs in Deutschland, wobei ein Großteil dieser Nutzfahrzeuge mit Benzin betrieben werden. Darüber hinaus beträgt der Dieselanteil bei Sattelzugmaschinen etwa 99 %. Alternative Antriebe sind daher vor allem bei den leichten Nutzfahrzeugen, wie z. B. Sprinter oder Transporter zu finden. Damit gilt, je höher das Gesamtgewicht eines LKWs, desto weniger verbreitet sind alternative Antriebe.²⁴

Zum Jahresende 2017 waren ca. 12.000 Nutzfahrzeuge mit einem Elektroantrieb (Batterie, Plug-in-Hybride oder Brennstoffzelle) zugelassen. Die dazugehörige Ladeinfrastruktur umfasst etwa 11.000 Ladepunkte. Damit lässt sich festhalten, dass sich der Markt mit alternativen Antrieben und die dazugehörige Tank- und Ladeinfrastruktur noch im Anfangsstadium befindet, obwohl es bereits in 28 deutschen Ballungsräumen zu Überschreitungen der von der EU festgelegten Stickstoffdioxid-Emissionen kommt.²⁵

2.1.5 Angebot und Nachfrage alternativer Antriebe

Der Markt für schwere Nutzfahrzeuge in Deutschland wird im Wesentlichen von sieben Herstellern dominiert. Diese sind DAF, Iveco, MAN, Mercedes-Benz, Renault, Scania und Volvo. Dabei gilt es zu beachten, dass Renault zum Volvo-Konzern gehört sowie MAN und Scania Tochterunternehmen der Volkswagen AG sind. Die Marktorientierung der in Deutschland maßgeblichen LKW-Hersteller in Bezug auf den Antriebsstrang gestaltet sich zwiespältig.²⁶ Dies ist primär darauf zurück zu führen, dass es eine Vielzahl von alternativen Antriebsarten gibt und damit Investitionen in eine bestimmte Technologie aus Sicht der OEMs sowie den LKW-Betreibern als riskant erscheinen. Dies wird durch den ungewissen Ausbau der jeweiligen Versorgungsinfrastruktur weiter verstärkt.²⁷ Darüber hinaus haben einerseits, die unter hohem Kostendruck operierenden Kunden nur mäßiges Interesse und geringe Zahlungsbereitschaft für Fahrzeuge mit alternativen Antrieben geäußert und andererseits liegen die Kernkompetenzen der Hersteller in der Produktion von Verbrennungsmotoren, Getrieben und deren Antriebssträngen.²⁸

Der erste Anbieter, der ein in Serie gefertigtes elektrifiziertes Hybridfahrzeug mit einer Nutzlast von 12 t auf den Markt brachte, war Mercedes im Jahr 2010 mit dem Atego. Im Jahr 2016 wurde auf der IAA ein Fahrzeug für den schweren Verteilerverkehr vorge stellt.²⁹

²⁴ vgl. Shell Nutzfahrzeug-Studie (2016 online, S. 25f.)

²⁵ vgl. NOW (2017 online, S. 3)

²⁶ vgl. Wietschel (2017, S. 225ff.)

²⁷ vgl. Fraunhofer (2018 online, S. 4)

²⁸ vgl. Wietschel (2017, S. 225ff.)

²⁹ vgl. AMZ (2017, S. 11)

Seit Ende 2018 testet Mercedes den neuen eActros, der mit serienreifen bzw. seriennahen Teilen ausgestattet wurde. Des Weiteren wird die Entwicklung der Brennstoffzelle vorangetrieben, um die Reichweite in Zukunft insgesamt erhöhen zu können.³⁰

Im Jahr 2017 begann schließlich MAN mit dem Test elektrifizierter Sattelzugmaschinen, die über eine Reichweite von ca. 150 km verfügten.³¹ Momentan gilt MAN als einer der ersten Hersteller, die in Ihrem Produktportfolio vollelektrische Fahrzeuge für den Bereich der City-Logistik zwischen 3 und 26 t anbietet. Dazu zählt unter anderem der vollelektrische Verteiler-LKW, der MAN eTGM.

Renault begann bereits Anfang 2012 mit dem Test eines elektrifizierten 16-Tonnern im Praxiseinsatz. Mit diesem Fahrzeug könnten CO₂ Einsparungen von bis zu 86 % gegenüber herkömmlichen Fahrzeugen erreicht werden. Neben dem Ziel die Energieeffizienz von Diesel-LKWs erhöhen zu können, investiert Renault auch weiterhin in Forschung und Entwicklung der E-Mobilität.³² Volvo testet ebenfalls Hybrid-LKWs, vorrangig im Fernverkehr.³³ Des Weiteren greifen einige Hersteller bereits auf verflüssigtes Erd- bzw. Biogas als Treibstoff zurück. So sehen primär Iveco, Scania und darüber hinaus Volvo im Erdgas eine sinnvolle Brückentechnologie.³⁴

Des Weiteren gibt es ein Angebot an Firmen, die sich auf die Umrüstung von konventionellen Lastkraftwagen spezialisiert haben. Dazu zählen neben dem Schweizer Unternehmen eForce, die Firma FRAMO GmbH aus dem sächsischen Langenbernsdorf, die für den jeweiligen Anwendungsfall maßgeschneiderte Antriebskonzepte liefern können.³⁵

Darüber hinaus hat der weltweit führende Hersteller an innovativen Antriebssystemen, die Deutz AG, vor kurzem eine Kooperation mit dem Start-up-Unternehmen KEYOU unterzeichnet, mit dem Ziel der Industrialisierung und Kommerzialisierung von CO₂-freien Wasserstoffmotoren. KEYOU entwickelt für Fahrzeug- und Motorenhersteller innovative Wasserstofftechnologien, mit deren Einsatz konventionelle Motoren zu emissionsfreien Wasserstoffmotoren umgebaut werden können. Gemeinsam verfolgen diese beiden Partner das Ziel, zu Beginn des Jahres 2020 erste Prototypen vorzustellen. Schließlich ist bis zum Jahr 2022 eine Serienreife dieser Technologie angestrebt.³⁶

³⁰ vgl. DVZ (2018, S. 4f.)

³¹ vgl. AMZ (2017 online, S. 12)

³² vgl. DVZ (2018, S. 5)

³³ vgl. AMZ (2017, S. 12f.)

³⁴ vgl. DVZ (Nr. 5 vom 30.01.2019)

³⁵ vgl. AMZ (2017 online, S. 10)

³⁶ vgl. DEUTZ (2019 online)

2.2 ANTRIEBSTECHNOLOGIEN STATE OF THE ART

Die Segmentierung alternativer Antriebstechnologien gestaltet sich vielschichtig. Das Fraunhofer Institut unterscheidet anhand von acht Alternativen zum konventionellen Diesel:³⁷

- Dual-Fuel Antrieb
- Elektroantrieb (Batterie)
- Elektroantrieb (Brennstoffzelle)
- Serieller Hybridantrieb
- Paralleler Hybridantrieb
- Synthetischer Kraftstoff
- Biokraftstoff
- Gas-Antrieb (CNG/LNG)

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wird neben der Dieselsechnologie die folgende Segmentierung für alternative Antriebstechnologien gewählt und nachfolgend erläutert:

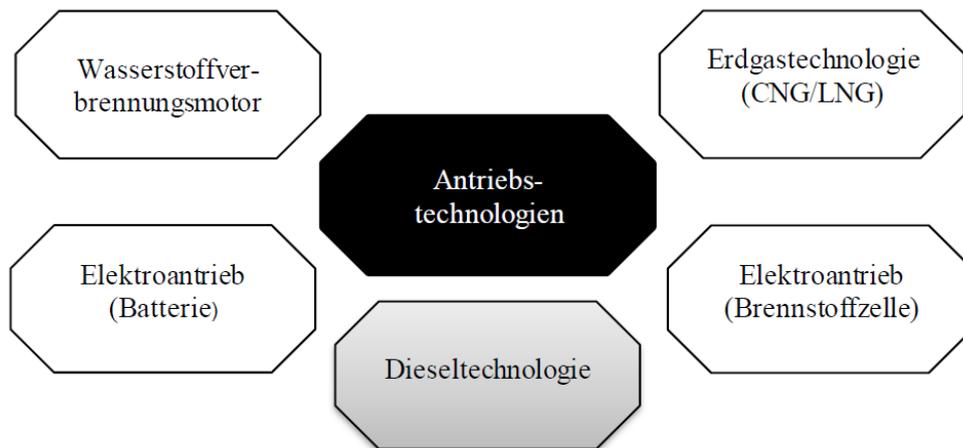


Abbildung 2: Antriebstechnologien State of the Art³⁸

³⁷ Vgl. Rüdiger (2014, S.22f.)

³⁸ Quelle: Eigene Darstellung

2.2.1 Dieselsechnologie

Dieselmotoren zählen zu den nicht-regenerativen Kraftstoffen. Durch die Verbrennung von Dieselmotoren entstehen vorrangig Stickoxid-Emissionen sowie Feinstpartikel im Abgas.³⁹

Der Dieselmotor gilt seit mehr als 100 Jahren als effizienteste Antriebsmethode unter den Verbrennungsmotoren und ist aufgrund seines hohen Anteils im Güterverkehr als Benchmark zu sehen, da sich mit dieser Antriebsart jeder zukünftige Antrieb messen muss. Doch selbst der Diesel hat eine lange Evolution durchlaufen. So hat sich beispielsweise die Zusammensetzung des Kraftstoffes wesentlich verändert. Dieselmotoren sind ein Gemisch aus verschiedenen Kohlenwasserstoffen. Insgesamt hat der Dieselmotoren etwa 500 Inhaltsstoffe und 200 verschiedene Kohlenwasserstoffe. Anhand des Kohlenstoffgehalts unterscheidet sich der Dieselmotoren vom Ottomotoren. Während Diesel insgesamt mehr Energie pro Liter enthält, was auf die höhere Anzahl an Kohlenstoffatomen im Vergleich zum Ottomotoren zurück zu führen ist, entsteht bei der Verbrennung ein insgesamt höherer CO₂-Anteil im Vergleich zum Ottomotoren.⁴⁰

Nachdem aufgrund der dynamischen Entwicklung des Straßengüterverkehrs in den 1980er Jahren die Luftschadstoffemissionen ihren Höhepunkt erreichten und daraufhin EU-weite Abgasemissionsstandards für Kraftfahrzeuge eingeführt wurden, begannen die Hersteller mit technischen Innovationen ihre Fahrzeuge zu optimieren. Dazu zählen beispielsweise Abgasreinigungstechniken, die zur wesentlichen Verbesserung der Abgasqualität des Dieselmotors bis heute ihren Beitrag leisten.⁴¹

Dennoch konnte die Antriebsleistung von Dieselmotoren nicht erhöht werden. Um daher zukünftig die Energie- bzw. Treibstoffeffizienz zu steigern, sowie die Treibhausgasemissionen des Straßengüterverkehrs zu reduzieren, sind die Hersteller gefordert. Mögliche Ansatzpunkte sind u. a. die Optimierung des Wirkungsgrads, die Hybridisierung und die Abwärmenutzung, um schließlich die Effizienz zu erhöhen. Unter der Verbesserung des Wirkungsgrades ist die Elektrifizierung von Nebenaggregaten wie z. B. Öl- und Wasserpumpen zu verstehen. In dieser Maßnahme wird die Möglichkeit gesehen, den gesamten Wirkungsgrad um 7 bis 14 % zu erhöhen. Darüber hinaus kann durch Hybridisierung elektrische Energie aus dem Fahrzeugbetrieb, die beim Fahrzeugbetrieb des Verbrennungsmotors entsteht, beispielsweise beim Bremsvorgang ähnlich wie bei einem elektrifizierten Fahrzeug rekuperiert werden und in Akkumulatoren, die parallel zum Verbrennungsmotor arbeiten, gespeichert werden. Ein solches Hybridsystem eignet sich vorrangig bei häufigen Brems- und Anfahrvorgängen in urbanen und regionalen Einsatzgebieten. Hierbei ist mit Kraftstoffeinsparungen von bis zu 20 % zu rechnen bzw.

³⁹ vgl. Corradini / Krimmer (2003, S. 14)

⁴⁰ vgl. Puls (2006, S. 21)

⁴¹ vgl. Shell Nutzfahrzeug-Studie (2016 online, S. 34f.)

auf der Langstrecke mit etwa 5 %. Schließlich bietet die Abwärmenutzung ein Effizienzpotenzial von ca. 5 %, denn mehr als 50 % der im Kraftstoff gespeicherten Energie geht beim Verbrennungsmotor in Form von Wärme über die Motorenkühlung verloren. Eine Voraussetzung für die Abwärmenutzung stellt ein gleichmäßiger Strom der wärmeenergiereichen Abgase dar, die vor allem im Fern- und Langstreckenverkehr gegeben wären.⁴²

Eine Alternative zum fossilen Diesel stellen Biodiesel und synthetische Kraftstoffe dar. Bei der Herstellung von Biodiesel werden pflanzliche und tierische Öle, Fette sowie Raps verwendet. Biodiesel wird jedoch nicht in reiner Form verwendet, sondern häufig dem fossilen Diesel beigemischt, um dadurch die vorgeschriebenen Emissionsgrenzwerte einhalten zu können. Neben Biodiesel ist der Einsatz synthetischer Kraftstoffe denkbar. Diese bestehen aus Alkanen und sind nahezu stickstofffrei. Damit kann ebenfalls zur Reduktion der Luftschadstoffemissionen beigetragen werden.⁴³

2.2.2 Erdgastechnologie

Erdgas als Brennstoff ist so universell einsetzbar wie Öl. Das Erdgas gestaltet sich aufgrund der geringeren Emissionen, die bei der Verbrennung entstehen, gegenüber konventionellen Kraftstoffen, als vorteilhaft. Beim Verbrennen von Erdgas entstehen kaum Schwefeldioxide bzw. Stickoxide.⁴⁴ Erdgas ist ein natürliches Gasgemisch, das wie Rohöl in unterirdischen Lagerstätten zu finden ist. Neben Ethan und Propan ist Methan der Hauptbestandteil von Erdgas. Die genaue Zusammensetzung des Erdgases ist abhängig vom Herkunftsland. In Biogasanlagen kann auf Basis eines natürlichen Vergärungsprozesses Biogas gewonnen werden, das dem fossilen Erdgas in seiner Zusammensetzung sehr ähnlich ist.⁴⁵

LPG, CNG, LNG, SNG, Erdgas usw. sind beispielhafte Bezeichnungen für gasförmige Brennstoffe. Im Gegensatz zu festen oder flüssigen Brennstoffen sind gasförmige Brennstoffe weder in Form noch im Volumen beständig. Daher müssen gasförmige Brennstoffe in geschlossenen Behältern gespeichert werden.⁴⁶ Für den Einsatz von gasförmigen Brennstoffen im Mobilitäts- und Verkehrssektor stellt die Tatsache, dass die Energiemenge je Volumeneinheit bei gasförmigen Brennstoffen geringer ist, als bei flüssigen Brennstoffen einen Nachteil dar. Unter Normalbedingungen hat Erdgas eine um den Faktor 1.000 höhere Dichte je Liter verglichen mit dem Diesel. Somit werden entweder

⁴² vgl. Shell Nutzfahrzeug-Studie (2016 online, S. 36f.)

⁴³ vgl. Shell Nutzfahrzeug-Studie (2016 online, S. 39)

⁴⁴ vgl. Dingel (2004, S. 163)

⁴⁵ vgl. Lange / Auffermann (2016, S. 51)

⁴⁶ vgl. Lange / Auffermann (2016, S. 49)

große Gastanks benötigt oder die mit der Tankfüllung verbundene Reichweite muss gering sein.⁴⁷

Die Speicherung von Erdgas in Fahrzeugen erfolgt im Allgemeinen komprimiert auf 200 bar (Compressed Natural Gas; CNG) in Druckbehältern. Die Anordnung der Druckgastanks ist abhängig vom Fahrzeugkonzept. Bei LKWs über 7,5 t erfolgt die Anordnung der Druckgasbehälter in der Regel meist außen, längs des Rahmens. Die Behälter bestehen entweder aus Stahl, Metall-Kunststoff oder aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff. Diesem Material wird aufgrund des geringen Gewichtes großes Potenzial bei der Verwendung von Tanks zugeschrieben.⁴⁸ Auch wenn eine weitere Komprimierung und damit eine erhöhte Reichweite möglich ist, ist aus Sicherheitsgründen eine Erhöhung des Drucks zur Anwendung im Straßenverkehr nicht zulässig. Des Weiteren kann die Energiedichte von Erdgas durch Abkühlen und Verflüssigen erhöht werden. Erdgas wird bei einer Temperatur von -150 bis 160 °C flüssig. Die Energiedichte von flüssigem Erdgas (liquified natural gas; LNG) ist dreimal so hoch wie die Energiedichte von CNG-Gas.⁴⁹

Eine Kombination aus Erdgas und Diesel stellt das Dual-Fuel-Prinzip dar. Bei diesem Verfahren werden gleichzeitig zwei Kraftstoffe, nämlich Erdgas und Diesel in den Brennraum eingespritzt. Einen Vorteil der Dual-Fuel-Technik stellt die Gegebenheit dar, dass ein Antrieb nur mit Diesel ebenfalls möglich ist, sofern kein Erdgas bzw. eine entsprechende Tankstelle zu Verfügung stehen sollte. Der Antrieb nur mit Erdgas ist hingegen nicht möglich.⁵⁰

Zwar kann Erdgas in modifizierten Verbrennungsmotoren eingesetzt werden, allerdings ist Erdgas als fossiler Kraftstoff nur limitiert vorhanden und trägt insgesamt zu CO₂-Emissionen bei, wenn auch vermindert.⁵¹ Ein Argument für den Einsatz von Erdgas in Nutzfahrzeugen stellt die Mautbefreiung seit Anfang 2019 von CNG- und LNG-Fahrzeugen bis zum Jahr 2020 in Deutschland dar. Nach Angaben des Kraftfahrt-Bundesamts sind aktuell 339 Erdgas-LKW in Deutschland zugelassen.⁵²

2.2.3 Elektroantrieb (Batterie)

Der Definition nach zählen alle Fahrzeuge, die von einem Elektromotor angetrieben werden und ihre Energie vorrangig aus dem Stromnetz beziehen sowie von außen aufladbar sind zur Kategorie der Elektrofahrzeuge. Darüber hinaus dürfen Elektrofahrzeuge nicht mehr als

⁴⁷ vgl. Lange / Auffermann (2016, S. 51)

⁴⁸ vgl. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (1998, S. 15f.)

⁴⁹ vgl. Lange / Auffermann (2016, S. 51)

⁵⁰ vgl. Shell Nutzfahrzeug-Studie (2016 online, S. 43)

⁵¹ vgl. Corradini / Krimmer (2003, S. 12)

⁵² vgl. Eurotransport (2018 online)

50 g Kohlendioxid pro Kilometer ausstoßen und müssen über eine Mindestreichweite von 30 km verfügen.⁵³ Allerdings sind heute die meisten Elektrofahrzeuge keine reinen E-Fahrzeuge, sondern Hybridfahrzeuge. Diese Fahrzeuge verfügen neben dem Verbrennungsmotor über einen leistungsfähigen Elektromotor mit einer Batterie und einem Ladestromanschluss. Diese Fahrzeuge werden als Plug-in-Hybridfahrzeuge bezeichnet. Demgegenüber stehen batterieelektrische Fahrzeuge, die nur über einen Elektromotor verfügen und vollkommen elektrifiziert sind. Die rein batterieelektrischen Fahrzeuge werden vorrangig bei Kurier- und Expressdienstleister im regionalen Verteilerverkehr eingesetzt. Bei Fahrzeugen über 3,5 t gab es in der Vergangenheit einige Prototypen, die im Rahmen des Verteilerverkehrs in Städten getestet wurden. Dabei kann der genutzte Fahrstrom für beide Fahrzeugarten zur Speicherung direkt in Batterien bzw. über Oberleitungen zugeführt werden.⁵⁴

Obwohl es bereits im 19. Jahrhundert erste batterieelektrisch betriebene Fahrzeuge gab, liegt die Schwierigkeit dieser Antriebsart in der mangelnden volumen- und gewichtsspezifischen Speicherfähigkeit der Batterien. So sind z. B. Bleiakkus zwar enorm zuverlässig, aber auch groß und schwer.⁵⁵

In den 1980er Jahren kam es im Rahmen von Umweltdiskussionen aufgrund der ökologischen Vorteile zum Comeback dieser Antriebsart. Denn der große Vorteil der Elektrofahrzeuge liegt darin, dass sie keine lokalen Abgasemissionen verursachen, was allerdings nicht bedeutet, dass sie zu 100 % emissionsfrei sind. Die Emissionen fallen vorrangig bei der Stromerzeugung an und sind von der Energiequelle abhängig, aus der der Strom erzeugt wurde. Ein weiterer Vorteil von Elektrofahrzeugen sind darüber hinaus zumindest bei niedrigen Fahrgeschwindigkeiten die geringeren Lärmemission. Nachteilhaft ist dagegen die im unteren dreistelligen Kilometerbereich liegende Reichweite.⁵⁶ Moderne Batterien verfügen im Vergleich zu Bleibatterien zwar über eine höhere Energiedichte, sind allerdings entsprechend kostenintensiver. Allerdings kann die Lebensdauer der Batterie mit zwei bis vier Jahren deutlich geringer ausfallen. Basierend auf Forschung und Entwicklung können Lithium-Metall-Polymer-Batterien, Zink-Sauerstoff bzw. Zink-Luft- und Lithium-Luft-Batterien zukünftig im Falle einer Serienproduktion zu Kosteneinsparungen und höherer Lebensdauer beitragen.⁵⁷

Zurzeit sind die Kosten für Elektrofahrzeuge verglichen mit konventionellen Fahrzeugen deutlich höher. Des Weiteren stammen die seltenen Erden, die für die Herstellung der Elektromotoren benötigt werden aus China. Hier sind etwa 90 % der Rohstoffvorkommen

⁵³ vgl. Schröder (2017, S. 29)

⁵⁴ vgl. Shell Nutzfahrzeug-Studie (2016 online, S. 47f.)

⁵⁵ vgl. Puls (2006, S. 68f.)

⁵⁶ vgl. Puls (2006, S. 68f.)

⁵⁷ vgl. Stan (2012, S. 275)

vorzufinden. Eine künstliche Verknappung, steigende Preise und politische Abhängigkeiten sind daher nicht auszuschließen.⁵⁸

Ein großer Vorteil des Elektromotors stellt die Tatsache dar, dass kein Getriebe verbaut werden muss und daher keine Kupplung erforderlich ist. Das Drehmoment des Elektromotors kann daher bereits ab der Drehzahl Null annähernd das maximale Drehmoment erreichen. Deshalb übertrifft das Elektrofahrzeug bezogen auf die Beschleunigung die Vergleichswerte von modernsten Diesel- und Ottomotoren.⁵⁹ Elektromotoren verfügen über einen Wirkungsgrad von etwa 90 %.⁶⁰

2.2.4 Elektroantrieb (Brennstoffzelle)

Häufig werden Wasserstoff und Brennstoffzelle als Paketlösung betrachtet, genau genommen handelt es sich bei der Brennstoffzelle jedoch nicht um einen Antrieb, sondern um einen elektrochemischen Energiewandler, der aus fossilen oder regenerativen Kraftstoffen Strom erzeugt. Die Brennstoffzelle kann ihre Energie mit weniger Wärmeemissionen produzieren als ein Verbrennungsmotor.⁶¹

Die Grundlage des Fahrzeugantriebs eines Fahrzeugs auf Basis der Brennstoffzelle ist ein konventioneller Elektromotor, der durch eine oder mehrere Brennstoffzellen mit der nötigen Energie versorgt wird. Die Brennstoffzelle ist im Fahrzeug integriert und das zentrale Antriebsaggregat der Energieumwandlung. Dabei wird der in Tanks gespeicherte Wasserstoff in komprimierter bzw. verflüssigter Form durch die Brennstoffzelle in elektrische Energie umgewandelt.⁶² Es gibt unterschiedliche Varianten der Brennstoffzelle, jedoch beruhen alle auf dem gleichen Funktionsprinzip. Es verfügen alle Brennstoffzellentypen über eine Anode und eine Kathode, die durch einen Elektrolyten getrennt sind.⁶³ Für den Einsatz im Straßenverkehr eignet sich u. a. die PEMFC Brennstoffzelle. In dieser läuft eine chemische Umkehrung der Wasserstoffherstellung per Elektrolyse ab, indem molekularer Wasserstoff (H_2) durch eine Membran von dem in der Umgebungsluft enthaltenen Sauerstoff getrennt wird. An der Kathode treffen diese dann wieder aufeinander und reagieren mit dem vorhandenen Sauerstoff zu Wasser, wobei Energie in Form von Wärme frei wird. Dadurch entsteht schließlich Strom. Da das Brennstoffzellenfahrzeug mit molekularem Wasserstoff betrieben wird, ist es frei von

⁵⁸ vgl. Wagner et al. (2013, S. 7f.)

⁵⁹ vgl. Stan (2012, S. 268)

⁶⁰ vgl. Shell Nutzfahrzeug-Studie (2016 online, S. 49)

⁶¹ vgl. Puls (2006, S. 82f.)

⁶² vgl. Rüdiger (2014, S. 25)

⁶³ vgl. Puls (2006, S. 83f.)

lokalen Emissionen. Der Wirkungsgrad liegt bei ca. 60 bis 70 % bzw. bei Abwärmenutzung bei bis zu 90 %.⁶⁴

Es bleibt zukünftig abzuwarten, ob sich für Brennstoffzellen ein Massenmarkt entwickeln kann. In Deutschland gibt es zwar Programme zur Förderung der Brennstoffzellentechnologie, allerdings wird die Technologie bezogen auf den Brennstoffzellen-LKW bisher kaum von der Industrie wahrgenommen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass allen voran die Infrastruktur für Wasserstoff in Deutschland fehlt.⁶⁵

2.2.5 Wasserstoff (Verbrennungsmotor)

Wasserstoff kann als Ressource nie knapp werden, denn atomarer Wasserstoff (H) ist eines der am häufigsten vorkommenden Elemente der Erde. Allerdings ist der atomare Wasserstoff hochreaktiv, weshalb dieser in der Regel nur in gebundener Form vorliegt. Als Treibstoff für den Verbrennungsmotor oder die Brennstoffzelle kommt vorrangig der molekulare Wasserstoff (H₂) in Frage. Da es kaum natürliche Vorkommen an molekularem Wasserstoff gibt, muss dieser industriell hergestellt werden.⁶⁶ Weltweit werden jedes Jahr Millionen Kubikmeter Wasserstoff produziert, allerdings wird lediglich ein Teil davon für bestimmte Prozesse benötigt. Damit fällt ein Großteil des Wasserstoffs als Abfallprodukt an und wird vorrangig als Brennstoff genutzt.⁶⁷

Zur Herstellung von H₂ eignen sich unterschiedliche Verfahren, zu deren Herstellungsprozess jedoch Energie in Form von Wärme oder Elektrizität benötigt wird.⁶⁸ Die Herstellung von Wasserstoff ist aus regenerativen Energiequellen möglich. So könnte beispielsweise für die Herstellung von Wasserstoff der Strom verwendet werden, der in Deutschland bereits heute durch Windkraft und Solarzellen regenerativ erzeugt wird, aber nicht gebraucht wird.⁶⁹

Der Vorteil des Wasserstoffs liegt vorrangig in der Unabhängigkeit von einzelnen Herkunftsgebieten, im Gegensatz zum Öl oder der seltenen Erden aus China. Dafür gestaltet sich die Speicherung des Wasserstoffs als Treibstoff herausfordernd, denn Wasserstoff ist das kleinste und damit leichteste Element im Periodensystem. Daher kann es die meisten Materialstrukturen leicht durchdringen.⁷⁰ Des Weiteren ist das Raumangebot zur Speicherung des Wasserstoffs am Fahrzeug gering. Im Falle des flüssigen Wasserstoffs

⁶⁴ vgl. Puls (2006, S. 85f.)

⁶⁵ vgl. Gnann et al. (2017, S. 47f.)

⁶⁶ vgl. Puls (2006, S. 70-74)

⁶⁷ vgl. VDA (2009 online, S. 24)

⁶⁸ vgl. Puls (2006, S. 70-74)

⁶⁹ vgl. VDA (2009 online, S. 24)

⁷⁰ vgl. Puls (2006, S. 70-74)

ergeben sich bezogen auf das Volumen ähnliche Schwierigkeiten. Eine Speicherung ist außerdem eine technische Herausforderung, da der Wasserstoff auf -252 °C gekühlt werden muss, um flüssig zu bleiben. Darüber hinaus ist eine mehrschichtige, komplexe Bauweise eines Wasserstofftanks mit entsprechender Isolierung notwendig, um dem hohen Druck des Wasserstoffs standhalten zu können.⁷¹

Insgesamt ist ein Wasserstofffahrzeug in einer Tank-to-Wheel-Betrachtung zwar emissionsfrei, da beim Verbrennen von Wasserstoff sowohl im Verbrennungsmotor als auch in einer Brennstoffzelle nur Wasserdampf entsteht. Somit hat Wasserstoff zwar eine vorteilhafte Ökobilanz, da keine direkten Emissionen ausgestoßen werden, jedoch müssen die indirekten Emissionen der Wasserstoffbereitstellung dabei stets berücksichtigt werden.⁷²

2.3 ALTERNATIVE ANTRIEBE IM VERGLEICH

2.3.1 Kosten-Analyse

Beim Thema Wirtschaftlichkeit schneiden alle alternativen Antriebe im Vergleich schlecht ab, da sind sich die befragten Experten einig. Dies ist vor allem auf geringe Reichweiten, die fehlende Nutzlast sowie die fehlende Serienreife zurückzuführen. Darüber hinaus sollte die Wirtschaftlichkeit anhand der einzelnen Gewichtsklassen in Relation zur Fahrleistung betrachtet werden. Schließlich können staatliche Förderungen bzw. Subventionen die Wirtschaftlichkeit alternativer Antriebe positiv beeinflussen.

Zur Betrachtung der Kosten alternativer Antriebe werden die Parameter Investitionen, Tankgröße, Verbrauch sowie die Kosten für Wartung- und Instandhaltung bewertet. Ausgehend vom Jahr 2015 sollen die potenziellen Veränderungen der Parameter für das Jahr 2030 prognostiziert und beide Werte miteinander verglichen werden. Den Ausgangspunkt bilden jeweils die Nettolistenpreise der Fahrzeuge.

Die Kraftstoffkosten können wie bereits erwähnt, bei einer Jahresfahrleistung von etwa 100.000 km pro Jahr bis zu 30 % der Gesamtkosten beitragen und stellen somit den zweitgrößten Anteil an den Gesamtkosten dar. Der Kraftstoffverbrauch im LKW-Segment ist primär von der Auslastung, sowie der Nutzlast des Fahrzeugs abhängig. Da nicht immer von einer vollen Auslastung der Nutzlast ausgegangen werden kann, wird für die nachfolgende Berechnung eine Auslastung von 50 % angenommen. Die in der Prognose veranschlagten Wartungskosten beinhalten Pflege- und Reparaturkosten und werden nachfolgend für eine Nutzungsdauer von sechs Jahren bestimmt. Die Verbrauchswerte für

⁷¹ vgl. Stan (2012, S. 240f.)

⁷² vgl. Puls (2006, S. 70-74)

die jeweiligen Gewichtsklassen stammen aus dem Handbuch für Emissionsfaktoren des Ifeu-Instituts.⁷³

Diesel 2015		Gewichts- klasse	Gewichts- klasse	Gewichts- klasse	Gewichts- klasse	Gewichts- klasse
Attribut	Einheit	0 - 3,5 t	3,51 - 7,5 t	7,51 - 12 t	> 12 t	SZM
Investitionen	Euro	30.000	40.000	50.000	65.000	102.000
Tankgröße	Liter	75	120	120	570	570
Verbrauch	KWh/km	0,74	1,32	1,82	2,39	3,11
Wartung u. Instandhaltung	Euro/km	0,0914	0,1718	0,1643	0,1565	0,1427
Diesel 2030		Gewichts- klasse	Gewichts- klasse	Gewichts- klasse	Gewichts- klasse	Gewichts- klasse
Attribut	Einheit	0 - 3,5 t	3,51 - 7,5 t	7,51 - 12 t	> 12 t	SZM
Investitionen	Euro	37.470	49.960	62.450	81.998	128.673
Tankgröße	Liter	75	120	120	570	570
Verbrauch	KWh/km	0,61	1,09	1,50	1,69	2,46
Wartung u. Instandhaltung	Euro/km	0,0914	0,1718	0,1643	0,1565	0,1427

Tabelle 1: Dieselsechnologie - Entwicklung der Parameter bis 2030⁷⁴

Die Nettolistenpreise im Jahr 2015 für Dieselfahrzeuge betragen 30.000 Euro für leichte Nutzfahrzeuge und steigen bei Sattelzugmaschinen auf bis zu 100.000 Euro an. Im Jahr 2030 wird im Vergleich dazu mit steigenden Anschaffungskosten gerechnet, wie anhand der Tabelle dargestellt ist. Dies ist auf Effizienzmaßnahmen zur Steigerung des Wirkungsgrads zurück zu führen.⁷⁵

Bei schweren Nutzfahrzeugen wird davon ausgegangen, dass eine Kraftstoffverbrauchsreduktion um 21 % zu einer Steigerung der Kosten, abhängig von der Gewichtsklasse, von etwa 26 % führt. Damit würden beispielsweise für Sattelzugmaschinen die Preise bis 2030 von 102.000 Euro auf 129.000 Euro ansteigen. Die

⁷³ vgl. Wietschel et al. (2017, S. 78f.)

⁷⁴ Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Wietschel et al. (2017, S. 78f.)

⁷⁵ vgl. Wietschel et al. (2017, S. 79f.)

Effizienzmaßnahmen führen bei Betrachtung der Sattelzugmaschine gleichzeitig gegenüber dem Jahr 2015 zu einem Rückgang des Kraftstoffverbrauchs von 31 l auf 100 km auf ca. 25 l auf 100 km.⁷⁶

CNG/LNG 2015		Gewichts- klasse	Gewichts- klasse	Gewichts- klasse	Gewichts- klasse	Gewichts- klasse
Attribut	Einheit	0 - 3,5 t	3,51 - 7,5 t	7,51 - 12 t	> 12 t	SZM
Investitionen	Euro	33.500	61.538	76.923	100.000	137.000
Tankgröße	kg					
Verbrauch	KWh/km	0,82	1,46	2,01	2,66	3,46
Wartung u. Instandhaltung	Euro/km	0,1064	0,1998	0,1890	0,1799	0,1647
CNG/LNG 2030		Gewichts- klasse	Gewichts- klasse	Gewichts- klasse	Gewichts- klasse	Gewichts- klasse
Attribut	Einheit	0 - 3,5 t	3,51 - 7,5 t	7,51 - 12 t	> 12 t	SZM
Investitionen	Euro	42.311	77.723	97.154	143.000	195.910
Tankgröße	kg					
Verbrauch	KWh/km	0,60	1,07	1,47	2,14	2,78
Wartung u. Instandhaltung	Euro/km	0,0914	0,1718	0,1643	0,1565	0,1427

Tabelle 2: Erdgastechnologie - Entwicklung der Parameter bis 2030⁷⁷

Die Anschaffungskosten fallen beim Erdgasfahrzeug in allen Gewichtsklassen wie bereits erwähnt höher aus als beim Diesel-LKW. Diese Kostenerhöhung ist primär auf die komplexe Tanktechnologie und die Anpassung des Motors zurückzuführen. In der Summe sind die Gesamtkosten, abhängig der Gewichtsklasse, etwa 30 % höher als beim Diesel-LKW. Darüber hinaus fallen die Wartungskosten gegenüber dem Diesel LKW ebenso etwa 15 % höher aus, wie in der Tabelle aufgezeigt.⁷⁸

Ebenso wie bei der Diesel-Technologie führt der technische Fortschritt bis zum Jahr 2030 zu einer Senkung des Kraftstoffverbrauchs bei LNG-/CNG-Fahrzeugen. Durch die

⁷⁶ vgl. Wietschel et al. (2017, S. 80f.)

⁷⁷ Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Wietschel et al. (2017, S. 94)

⁷⁸ vgl. Wietschel et al. (2017, S. 93)

Verbesserung von Aerodynamik bzw. die Optimierung der Kraftstoffverbrennung, sinkt der spezifische Energieverbrauch bis zum Jahr 2030 um ca. 20 %. Gleichzeitig führen die Effizienzmaßnahmen zu steigenden Investitionen, im Vergleich zum Jahr 2015 um etwa 40 %. Dieser überdurchschnittliche Anstieg ist auf die komplexe Antriebstechnologie zurückzuführen, deren Anpassung z. B. aufgrund des Tanksystems im Vergleich zum Diesel-LKW kostenintensiver ist. Im Gegensatz dazu sinken die Wartungskosten um 13 %, womit Skaleneffekte bei Wartung- und Reparatur realisiert werden können. Die in Tabelle 2 aufgeführten Parameter zeigen, dass die Betriebskosten entscheidend durch die steigenden Investitionskosten und dem sinkenden Energieverbrauch beeinflusst werden.⁷⁹

Da elektrisch angetriebene Fahrzeuge bis auf wenige Ausnahmen in der leichten Gewichtsklasse nicht in den Produktportfolios der Hersteller auftauchen, gibt es keine Erkenntnisse zu dessen Listenpreisen. Basierend auf der Annahme, dass sich Elektrofahrzeuge im Wesentlichen in ihrem Antriebsstrang von einem Diesel-LKW unterscheiden, wird von vergleichbaren Investitionskosten zuzüglich Batteriekosten und Kosten für den Antriebsstrang ausgegangen.

Der Elektroantrieb hat insgesamt den niedrigsten Energieverbrauch aller Antriebsarten, was auf den hohen Wirkungsgrad zurückzuführen ist. Die Kosten für Wartung und Instandhaltung d. h. Reparatur-, Wartungs- und Pflegekosten sind wesentlich geringer als beim Diesel-LKW. Allerdings sind die Kosten für die Batterie auf den einzelnen Kilometer heruntergerechnet, den Wartungs- und Instandhaltungskosten zuzurechnen. Damit tragen die Batteriekosten etwa 80 % der Gesamtkosten für Wartung und Instandhaltung im Jahr 2015 bei, wie in Tabelle 3 dargestellt wird.⁸⁰

Im Jahr 2030 ist hingegen mit Kostensenkungen bei den Komponenten zu rechnen. Diese wirken sich jedoch nicht so stark aus, wie die sinkenden Preise für Batterien, die bis zum Jahr 2030 erwarten lassen. Damit sinken die Gesamtinvestitionen und die Wartungs- und Instandhaltungskosten. Bezogen auf den Energieverbrauch besteht beim elektrischen Antriebsstrang kaum nennenswertes Optimierungspotenzial.⁸¹

⁷⁹ vgl. Wietschel et al. (2017, S. 94)

⁸⁰ vgl. Wietschel et al. (2017, S. 96)

⁸¹ vgl. Wietschel et al. (2017, S. 97)

BEV 2015		Gewichts- klasse	Gewichts- klasse	Gewichts- klasse	Gewichts- klasse	Gewichts- klasse
Attribut	Einheit	0 - 3,5 t	3,51 - 7,5 t	7,51 - 12 t	> 12 t	SZM
Investitionen	Euro	72.534	109.439	141.982	184.617	250.704
Tankgröße	kg	60	110	150	190	240
Verbrauch	KWh/km	0,35	0,63	0,88	1,09	1,4
Wartung u. Instandhaltung	Euro/km	0,091	0,168	0,221	0,256	0,306
BEV 2030		Gewichts- klasse	Gewichts- klasse	Gewichts- klasse	Gewichts- klasse	Gewichts- klasse
Attribut	Einheit	0 - 3,5 t	3,51 - 7,5 t	7,51 - 12 t	> 12 t	SZM
Investitionen	Euro	56.141	78.211	99.066	130.176	185.177
Tankgröße	kg	60	110	150	190	240
Verbrauch	KWh/km	0,308	0,5544	0,7744	0,9592	1,232
Wartung u. Instandhaltung	Euro/km	0,046	0,087	0,108	0,117	0,126

Tabelle 3: Elektroantrieb (Batterie) - Entwicklung der Parameter bis 2030⁸²

Demgegenüber verfügen Brennstoffzellenfahrzeuge über deutlich höhere Anschaffungskosten, da sich die Technologie noch in der Entwicklung befindet. Aufgrund höherer Wirkungsgrade ist der Energieverbrauch der Brennstoffzelle ca. 17 % niedriger als bei einem vergleichbaren Diesel-Fahrzeug. Im Gegensatz zu allen anderen alternativen Antriebstechnologien ist davon auszugehen, dass bis zum Jahr 2030 die Kosten mit steigendem technologischem Fortschritt sinken werden, sodass die Mehrkosten zum Diesel noch etwa 45.000 Euro betragen würden. Bei den Instandhaltungskosten ist davon auszugehen, dass die Kosten in etwa auf einem vergleichbaren Niveau zum Dieselfahrzeug liegen werden. Ein großes Kostensenkungspotenzial wird vorrangig in den Nebenkosten gesehen. Die Lebensdauer der Brennstoffzelle wird im Jahr 2015 mit 240.000 km und im Jahr 2030 mit ca. 400.000 km angegeben, siehe Tabelle 4.⁸³

⁸² Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Wietschel et al. (2017, S. 96f.)

⁸³ vgl. Wietschel et al. (2017, S. 101)

FCEV 2015		Gewichts- klasse	Gewichts- klasse	Gewichts- klasse	Gewichts- klasse	Gewichts- klasse
Attribut	Ein- heit	0 - 3,5 t	3,51 - 7,5 t	7,51 - 12 t	> 12 t	SZM
Investitionen	Euro	157.300	203.718	248.307	318.089	696.070
Tankgröße	kW/h	182,08	326,47	598,41	804,41	1046,58
Verbrauch	kWh/k m	0,61	1,09	1,50	2,01	2,62
Wartung u. In- standhaltung	Euro/ km	0,239	0,291	0,370	0,503	0,704
FCEV 2030		Gewichts- klasse	Gewichts- klasse	Gewichts- klasse	Gewichts- klasse	Gewichts- klasse
Attribut	Einheit	0 - 3,5 t	3,51 - 7,5 t	7,51 - 12 t	> 12 t	SZM
Investitionen	Euro	54.050	70.000	94.500	121.057	174.000
Tankgröße	kW/h	156,59	280,77	514,63	691,79	900,06
Verbrauch	kWh/km	0,52	0,94	1,29	1,73	2,25
Wartung u. Instandhal- tung	Euro/km	0,054	0,083	0,102	0,118	0,137

Tabelle 4: Elektrofahrzeug (Brennstoffzelle) - Entwicklung der Parameter bis 2030⁸⁴

2.3.2 SWOT-Analyse

Die SWOT-Analyse ist eine vielseitig einsetzbare Analysemethode. Zunächst werden auf Basis der internen Analyse die Stärken und Schwächen ermittelt, bevor basierend auf einer externen Analyse die Chancen und Risiken bewertet werden. In diesem Zusammenhang gilt es zu beachten, dass zwischen den Stärken und Schwächen sowie den Chancen und Risiken nicht zwingend ein Kausalverhältnis besteht. Die SWOT-Analyse stellt ein geeignetes Verfahren dar, um die aus unterschiedlichen Erhebungsmethoden gewonnenen Erkenntnisse detailliert zusammen zu stellen.

Im Rahmen dieses Beitrags wurde zunächst für die ausgewählten alternativen Antriebe eine SWOT-Analyse basierend auf Sekundärliteratur erstellt. Darauf aufbauend wurden die anhand der Experteninterviews gewonnenen Erkenntnisse ebenfalls in eine SWOT-Analyse

⁸⁴ Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Wietschel et al. (2017, 101f.)

eingearbeitet. Im nächsten Schritt wurden diese beiden SWOT-Analysen in zusammenfassenden Tabellen (Tabelle 4-9) dargestellt.

Die nachfolgenden SWOT-Analysen umfassen die praktischen und theoretischen gewonnen Erkenntnisse und betrachten anhand der beiden Dimensionen die untersuchten Antriebstechnologien. Bei der Auseinandersetzung mit dem Thema alternative Antriebe können diese Erkenntnisse für Unternehmen herangezogen werden und abhängig von der gewählten Untersuchung entsprechend bewertet werden.

Dieselseltechnologie	
Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> - Zuverlässigkeit und Reichweite - Ausgereifte und massentaugliche Technik - Erfahrungswerte der Mitarbeiter zur Technologie vorhanden - Antriebsart, die sich am wirtschaftlichsten darstellt - Instandhaltung/Reparatur zum Großteil hausintern möglich - Hohe Zuladung möglich - Hohe Verfügbarkeit und Verlässlichkeit sowie große Vielfalt an unterschiedlichen Fahrzeugtypen und Konfigurationen - Energiedichte des Kraftstoffs: kleiner und leichter Tank = hohe Reichweite (ca. 1000 km) - Standardantriebstechnik für alle Nutzfahrzeuge - Flächendeckendes Versorgungsnetz sowie Infrastruktur z. B. Tankstellen vorhanden 	<ul style="list-style-type: none"> - Fahrverbote in den Innenstädten führen heute bereits zu Einschränkungen/ zukünftig ist mit weiteren Ausweitungen der Fahrverbote zu rechnen - Schadstoffemissionen und Lärm - Alle Komponenten am Fahrzeug sind auf den Dieselantrieb ausgerichtet wie z. B. die Kühlung - Weitere motorseitige Optimierung begrenzt bzw. sehr kostenintensiv - Kraftstoffpreise vom internationalen Rohölpreis abhängig - Wirkungsgrad liegt bei 40 bis 45 % - Aufwendige Abgasnachbehandlung notwendig um aktuelle Grenzwerte einhalten zu können
Chancen	Risiken
<ul style="list-style-type: none"> - Durch Forschung bzw. Weiterentwicklung könnte der Diesel-Antrieb emissionsarmer werden - Alternative Antriebe bisher nicht ausgereift bzw. konkurrenzfähig im Alltag - Wirtschaftlichkeit über den gesamten Lebenszyklus - Nutzung von Effizienzpotenzialen u. a. Hybridisierung oder Abwärmenutzung zur Effizienzverbesserung - Beimischung von synthetischen Kraftstoffen zur Minderung der THG-Emissionen (Well-to-Wheel) - Starkes Interesse der OEMs an einer wichtigen Rolle des Diesels in Zukunft, aufgrund umfangreichen Know-Hows und hoher Wertschöpfung bei Motorenproduktion 	<ul style="list-style-type: none"> - Dieselfahrverbote in den Innenstädten bzw. Verschärfung der zulässigen Schadstoffemissionen - Abhängigkeit vom Öl – endliche Ressource - Effiziente Technologie, die in Verruf geraten ist, aufgrund der Fahrverbote - Endlichkeit fossiler Energieträger bzw. Einschränkungen basierend auf wirtschaftlichen und politischen Restriktionen - Energiesteuern und schwankender Ölpreis - Fahrverbote für Dieselfahrzeuge sowie verschärfte Umweltauforderungen - Wirtschaftliche Nutzung von alternativen Antrieben - Einführung von CO₂-Grenzwerten für schwere Nutzfahrzeuge

Tabelle 5: SWOT-Analyse Dieselseltechnologie ⁸⁵

⁸⁵ Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an: DVZ (2019) / Shell Nutzfahrzeug-Studie (2016 online, S. 41 / ifeu (2017 online, S. 19f.) sowie Experteninterviews

Elektroantrieb (Batterie)	
Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> - Geräuscharm und geringe Schadstoffemissionen - Energierückgewinnung durch Bremsvorgang - Vorteilhaft im Nahverkehr - Zukunftsweisende Technologie - Unmittelbare Kraftübertragung und hoher Wirkungsgrad sowie Rekuperation von Bremsenergie - Zuverlässigkeit des Elektromotors siehe den Einsatz bei Straßenbahnen - Positives Image - Geringe Wartungskosten / niedrige variable Kosten pro Kilometer - Hohes Drehmoment und gute Fahrdynamik - Potenzial zur effizienten Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energien 	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Ausfallzeiten aufgrund fehlender Serienreife - Hohe Anschaffungskosten, da keine Serienproduktion - Fast die gleichen Betriebskosten wie ein Sattelzug jedoch deutlich geringere Nutzlast aufgrund des Batteriegewichts - Kurze Reichweite von ca. 300 bis 400 Km daher im Fernverkehr schwer einzusetzen - Lange Ladezeit der Akkus daher lange Betankungszeit - Die Kosten eines Batteriesatzes sehr hoch (etwa 145.000 Euro) - Seltene Erden werden in den Batterien verbaut - Geringe Lebensdauer der Akkus - Marktreife fehlt, daher vorrangig Prototypen auf dem Markt
Chancen	Risiken
<ul style="list-style-type: none"> - Neue Batteriegeneration, um Gewicht zu reduzieren und höhere Reichweiten zu erzielen sowie die Ladezeit zu reduzieren - Infrastrukturausbau: Ladestationen an Be- bzw. Entladestationen - Oberleitungen im Stadtverkehr bzw. auf Autobahnen, um die Fahrzeuge dauerhaft mit Strom zu versorgen - Durch Serienproduktion können die Kosten gesenkt werden - Potenzial bei planbaren, täglichen Fahrleistungen in festgelegten Einsatzgebieten - Mögliches Potenzial zur Einsparung von THG-Emissionen bei entsprechendem oberleitungselektrischen Fahranteil auf der Langstrecke - Einfahrt in zukünftig evtl. emissionsbeschränkte Bereiche z. B. Innenstädte möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Strom aus fossilen Energieträgern wird als Grünstrom angeboten - Wirtschaftliche Abhängigkeit von seltenen Erden, die zur Herstellung der Batterien benötigt werden - Batterie muss unter Gefährdungsgesichtspunkten betrachtet werden – ist ein brennen oder überhitzen möglich? - Abhängigkeit der Technologieverbreitung von der Weiterentwicklung der Batterien abhängig - Dynamisches Marktumfeld in der Logistik erschwert langfristige Einsatzplanung der Fahrzeuge durch potenzielle Nutzer - Anreize für Investitionen in alternative Antriebe derzeit noch begrenzt

Tabelle 1: SWOT-Analyse Elektroantrieb (Batterie)⁸⁶

⁸⁶ Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an: DVZ (2019) / Shell Nutzfahrzeug-Studie (2016 online, S. 53 / ifeu (2017 online, S. 26f.) sowie Experteninterviews

Elektroantrieb (Brennstoffzelle)	
Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> - Kann Nah- und Fernverkehr abdecken - Geräuscharm und emissionsfrei - Schnelle Betankung - Reichweite höher als beim reinen E-LKW - CO₂-neutral - Können Beitrag zu emissionsfreier Mobilität leisten / lokal emissionsfrei - Hohe Reichweite (mehrere 100 km) sowie geräuscharmer Antrieb 	<ul style="list-style-type: none"> - Alltagstauglichkeit unter den alternativen Antrieben bisher nicht erreicht -trotz langer Forschungszeit - Lebensdauer einer Brennstoffzelle beträgt etwa 5 Jahre - Austausch der Brennstoffzelle sehr kostenintensiv - Reichweite beträgt etwa 250 km - Hohe Kilometerleistung notwendig, um wirtschaftlich zu sein - Schlecht ausgebaute Tankstelleninfrastruktur - Neben hohen Anschaffungskosten fallen hohe Betriebskosten an - Im LKW-Segment kaum erprobt und weit vom wirtschaftlichen Einsatz im Straßengüterverkehr entfernt - Kosten der Brennstoffzelle signifikant höher im Vergleich zu anderen Antriebsarten - Fehlende Betankungsinfrastruktur
Chancen	Risiken
<ul style="list-style-type: none"> - Mögliche Alternative, sofern positive Testfahrten in der Praxis vorliegen - Erhebliches technologisches Verbesserungspotenzial, um langfristig wettbewerbsfähig zu werden 	<ul style="list-style-type: none"> - Abhängig von seltenen Erden bzw. Metallen - Verfügbarkeit und Kosten von Edelmetallen am Weltmarkt - Fehlende Anreize für Investitionen

Tabelle 7: SWOT-Analyse Elektroantrieb (Brennstoffzelle)⁸⁷

⁸⁷ Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an: DVZ (2019) / Shell Nutzfahrzeug-Studie (2016 online, S. 54 / ifeu (2017 online, S. 24f.) sowie Experteninterviews

Erdgastechnologie	
(CNG und LNG werden nachfolgend gemeinsam betrachtet)	
Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> - Niedrige CO₂-Emissionen und weniger Lärm - LNG hat eine hohe Reichweite (ca. 1500 Km) und ist daher mit dem Diesel vergleichbar - Vorhandene Tankstelleninfrastruktur bei CNG - Kraftstoffgewinnung aus Biogasen möglich - Steuerbefreiung und Fördermöglichkeiten z. B. Mautbefreiung - Greifbare Alternative zum Diesel im Fernverkehr - „günstigste“ Alternative Antriebsvariante bezogen auf die Reinvestitionen - Marktreife bereits erreicht - Bis zu 20% weniger CO₂ Ausstoß im Vergleich zum fossilen Diesel und damit weniger Aufwand der Abgasnachbehandlung - Beimischung von Biogas verbessert die CO₂-Bilanz (Well-to-Wheel) - THG-Emissionen ca. 5 bis 20 % geringer als beim Diesel (Well-to-Wheel) 	<ul style="list-style-type: none"> - Infrastruktur des Tankstellennetzes (LNG) im In- und Ausland kaum vorhanden / aktuell nur drei LNG Tankstellen in Deutschland - Höherer Verschleiß vorrangig im Vergleich zum Diesel-LKW, daher höhere Instandhaltungskosten - Höhere Anschaffungskosten als beim Diesel - wenige Fahrzeugkategorien vorhanden, Entwicklung nimmt Zeit in Anspruch - Reichweite niedrig (300 bis 400 Km bei CNG) - Wirtschaftlichkeit gegenüber dem Diesel geringer - Druckprobleme beim Tanken im LKW-Segment - Hoher Energieaufwand, der zur Verflüssigung des Gases benötigt wird - Größere Tanks im CNG Bereich erforderlich für höhere Reichweite, führt letztlich zu fehlender Wirtschaftlichkeit aufgrund fehlender Nutzlast - Abhängigkeit des Gaspreises am Weltmarkt - Bisher nur wenige Hersteller mit verhältnismäßig teuren Fahrzeugen auf dem Markt - Kosten der Antriebstechnik und Wartungskosten fallen höher aus im Vergleich zum Diesel - Reduktion der Nutzlast durch schwere Tanks
Chancen	Risiken
<ul style="list-style-type: none"> - Ausbau Infrastruktur z. B. Bau von LNG-Tankstellen - Einführung von Dual-Fuel-Technik für schwere Nutzfahrzeuge - Geringere Kraftstoffkosten im Vergleich zum Diesel 	<ul style="list-style-type: none"> - Unter Umweltgesichtspunkten etwa 20 % vorteilhafter gegenüber dem Diesel, jedoch nicht wirklich nachhaltiger - Wenn der Dieselantrieb noch „sauberer“ werden sollte hinfällig - Steuervergünstigungen könnten nach 2020 wegfallen - Verfügbarkeit vorhandener Erdgasreserven - Einsatz im Sinne des Klimaschutzes nur bei stärkerer Dekarbonisierung der Vorkette möglich z. B. durch die Gaserzeugung aus erneuerbaren Energien

Tabelle 2: SWOT-Analyse Erdgastechnologie ⁸⁸

⁸⁸ Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an: DVZ (2019) / Shell Nutzfahrzeug-Studie (2016 online, S. 47 / ifeu (2017 online, S. 21f.) sowie Experteninterviews

Wasserstoffverbrennungsmotor	
Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> - Verbrennungsmotor mit einer Reichweite von bis zu 800 km - Verbrennungsmotor hat sich in der Vergangenheit bereits bewährt - Wasserstoff steht reichlich zur Verfügung - Kann als Speichermedium regenerativer Energieträger genutzt werden - Umweltverträglichkeit und „saubere Energie“ - Umbau bestehender Motoren möglich - Niedrige Lärmemissionen - Der Dieselantrieb ist als Benchmark zum Wasserstoffmotor zu sehen, da sich beide Fahrzeuge sehr ähnlich sind - Kurze Betankungszeit - Gesamtumweltbilanz am „saubersten“, da keine seltenen Erden / Stoffe benötigt werden - Inklusive Mautkosten insgesamt günstiger als der Diesel - Lokal emissionsfrei, da keine Abgase, nur Wasserdampf entsteht - Rohstoff Wasser ist reichlich vorhanden - Hoher Wirkungsgrad von Verbrennungsmotoren 	<ul style="list-style-type: none"> - Technik im LKW-Segment noch nicht erprobt und daher auch nicht vollständig ausgereift - Bisher nur Prototypen vorhanden - Sicherheitskomponenten zur Lagerung - Anschaffungskosten etwas höher als beim Diesel – etwa jedoch auf dem Niveau eines Erdgasfahrzeugs - Neue zukunftsweisende Technologie mit einem Mehrpreis - Etwas mehr Bauraum als beim Diesel wird benötigt, jedoch weniger als beim E-LKW - Sehr energieaufwändige Herstellung - Keine flächendeckende Infrastruktur vorhanden z. B. fehlende Tankstellen - Hohe Kosten für Drucktanks zur Speicherung des Wasserstoffs
Chancen	Risiken
<ul style="list-style-type: none"> - Vielversprechender alternativer Antrieb, der noch praxisnah getestet werden muss - Einsatz auch im Schiff- und Luftverkehr möglich, daher Synergieeffekte zu erwarten - Technologie kann mittel- bis langfristig wettbewerbsfähig werden 	<ul style="list-style-type: none"> - Bisher in der Praxis nicht erprobt, daher keine verlässlichen Daten zum Kraftstoffverbrauch, Lebensdauer etc. - Fehlende Anreize für Investitionen - Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur

Tabelle 9: SWOT-Analyse Wasserstoff ⁸⁹

⁸⁹ Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an: DVZ 2019 / Shell Nutzfahrzeug-Studie 2016 online:5 / ifeu 2017 online: 24f. sowie Experteninterviews

3 Schlussfolgerungen

Der Bestand in den verschiedenen Gewichtsklassen ist unterschiedlich. Zusammenfassend lässt sich festhalten, je höher das Gesamtgewicht eines LKWs, desto weniger verbreitet sind alternative Antriebe. Die verschiedenen alternativen Antriebe wurden im Rahmen des vorliegenden Beitrags anhand eines Stärken-Schwächen- bzw. Chancen-Risiken-Profiles betrachtet.

Zum jetzigen Zeitpunkt gibt es keinen „Königsweg“ bezogen auf alternative Antriebe, vielmehr müssen dem Bedarf entsprechende Antriebsvarianten für Unternehmen gefunden werden. Die Frage der Wahl der Antriebsart ist abhängig vom Einsatzgebiet, der Reichweite sowie der vorhandenen Tankstelleninfrastruktur und letztlich von der Marktreife der Technik. Aus heutiger Sicht kann Unternehmen nur geraten werden, alternative Antriebe unter realen Bedingungen zu testen, um sich das benötigte Know-How im Umgang mit alternativen Antrieben aneignen zu können.

Gegenwärtig liegt der Anteil an alternativen Antrieben bei etwa 4%. In Zukunft ist davon auszugehen, dass sich dieser deutlich erhöhen und sich der Mobilitätssektor der schweren und leichten Nutzfahrzeuge innerhalb der nächsten fünf bis zehn Jahren verändern wird. Dabei wird der Dieselantrieb mittelfristig sicherlich eine wichtige Rolle spielen, es bleibt daher abzuwarten, welche Antriebsart sich für welches Unternehmen in welchen Einsatzgebiet gegenüber dem Benchmark durchsetzen wird. Erdgas stellt bereits heute eine Art Brückentechnologie dar, während sich der Elektroantrieb auf dem besten Weg zur Serienreife befindet. Demgegenüber ist Wasserstoff als Antriebsvariante zumindest in der Praxis noch wenig erforscht. Erste Prototypen befinden sich aktuell in Planung. Während der Elektroantrieb über einen hohen Wirkungsgrad verfügt, hat sich der Dieselantrieb die letzten 100 Jahre bewährt. Der Wasserstoffverbrennungsmotor basiert auf dieser Technologie, ist hingegen lokal emissionsfrei. Die Brennstoffzelle überzeugt durch die höhere Reichweite im Vergleich zum E-Antrieb.

Schließlich verfügt jede Antriebstechnologie über Stärken und Schwächen, sowie daraus resultierende Chancen und Risiken. Daher ist in Zukunft von einem Technologiemix auszugehen. Die wesentlichen Argumente, ob sich eine Technologie am Markt etablieren kann ist primär von der Infrastruktur sowie der Marktreife abhängig. Des Weiteren werden die unterschiedlichen Anspruchsgruppen die Marktreife durch staatliche Förderungen wie z.B. Mauteinsparungen positiv bzw. negativ beeinflussen können. Gerade diese Subventionen stellen für Unternehmen einen Anreiz dar, auf alternative Antriebe zu setzen. Denn durch Förderungen, Anreize oder geringe Kraftstoffkosten können sich Fahrzeuge mit alternativen Antrieben über die entsprechende Laufzeit schon heute, trotz der höheren Anschaffungskosten amortisieren, sofern eine entsprechende Marktreife vorhanden ist.

Quellenverzeichnis

- Amtsblatt der EU (2014 online): <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R0253> (aufgerufen am 06.04.2019).
- AMZ (2017 online): https://www.amz-sachsen.de/wp-content/uploads/20170513_Studie.pdf (aufgerufen am 10.04.2019).
- AZE (o.J. online): <https://www.autoteile-aze.de/guter-stoffwechsel.html> (aufgerufen am 11.04.2019).
- BAG (2018 online): https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/kurzfristprognose-sommer-2018.pdf?__blob=publicationFile (aufgerufen am 06.04.2019).
- Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (1997): *Alternative Antriebstechnologien: ein Beitrag zur Luftreinhaltung*, 1.Auflage, München, 1997.
- Berekoven, Ludwig (1995): *Erfolgreiches Einzelhandelsmarketing: Grundlagen und Entscheidungshilfen*, 2.Auflage, München, 1995.
- BMU (o.J. online): https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutz_in_zahlen_klimaziele_bf.pdf (aufgerufen am 04.04.2019).
- BMVI (2014 online): <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2014/044-dobrindt-verkehrsprognose2030.htm> (aufgerufen am 06.04.2019).
- Corradini, Roger / Krimmer, Alex (2003): *Systemvergleich alternativer Antriebstechnologien: Primärenergetische Analyse der Herstellung und Nutzung alternativer Antriebstechnologien im Vergleich zu konventionellen Systemen für den PKW-Bereich*, 1.Auflage, München, 2003.
- Dingel, Oliver (2004): *Gasfahrzeuge: Die passende Antwort auf die CO₂-Herausforderung der Zukunft?*, 1.Auflage, Essen, 2004.
- DEUTZ (2019 online): <https://www.deutz.com/media/pressemitteilungen/deutz-bereitenden-weg-fuer-co2-freie-mobilitaet-mit-wasserstoffantrieben/> (aufgerufen am 19.04.2019).
- DVZ (2018): Nr. 31-35 vom 31.08.2018: 4-7.
- DVZ (2019): Nr. 5 vom 30.01.2019.
- Europäisches Parlament (2014 online): <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52014DC0285&from=DE> (aufgerufen am 06.04.2019).
- Eurotransport (2018 online): <https://www.eurotransport.de/artikel/keine-maut-fuer-gasfahrzeuge-verkehrsausschuss-korrigiert-mautgesetz-10476094.html> (aufgerufen am 06.04.2019).

- Fraunhofer (2018 online): https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2018/Thesen_Zukunft_StrG%C3%BCterverkehr.pdf (aufgerufen am 11.04.2019).
- Global Truck Study (2016 online): <https://www2.deloitte.com/de/de/pages/operations/articles/global-truck-study-2016.html#> (aufgerufen am 08.04.2019).
- Gnann, Till / Wietschel, Martin / Kühn, Andre / Thielmann, Axel / Sauer, Andeas / Plötz, Patrick / Moll, Cornelius (2017): Teilstudie "Brennstoffzellen-Lkw: Kritische Entwicklungshemmnisse, Forschungsbedarf und Marktpotential": wissenschaftliche Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie / Autorinnen und Autoren: Fraunhofer ISI; 1. Auflage, Karlsruhe, 2017.
- Ifeu (2017 online): https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/Roadmap-OH-Lkw_SWOT-Analyse.pdf (aufgerufen am 08.04.2019).
- IHK (2013 online): https://www.frankfurt-holm.de/sites/default/files/managed/daten_und_fakten_zu_staedtischen_wirtschaftsverkehren_holm.pdf (aufgerufen am 30.10.2018).
- Keuschen, Thomas / Klumpp, Matthias (2011): Green Logistics Qualifikation in der Logistikpraxis, Band 16, Essen, 2011.
- Lange, Volker / Auffermann, Christiane (2016): Technologie-Screening Handelslogistik: Perspektiven erkennen – Effizienz steigern, 1. Auflage, München, 2016.
- NOW (2017 online): https://www.starterset-elektromobilitaet.de/content/3-Infothek/3-Publikationen/6-urbaner-wirtschaftsverkehr/180206_21x21_brosch-re_wirtschaftsverkehr_ansicht-1.pdf (aufgerufen am 09.04.2019).
- Percy, Michalak (2009): Ökologische Logistik: Analyse von Wirkungszusammenhängen und Konzeption von ökologischen Wettbewerbs- und Logistikstrategien, 1. Auflage, Hamburg, 2009.
- Puls, Thomas (2006): Alternative Antriebe und Kraftstoffe: Was bewegt das Auto von Morgen?, 1. Auflage, Köln, 2006.
- Rüdiger, David (2014): Studie zu alternativen Antriebsformen im Straßengüterverkehr: Status Quo und Entwicklungsperspektiven, 1. Auflage, Stuttgart, 2014.
- Shell Nutzfahrzeugstudie (2016 online): <https://www.shell.de/medien/shell-publikationen/shell-nutzfahrzeug-studie.html> (aufgerufen am 05.04.2019)
- Schröder, Dustin (2017): Technisch-wirtschaftliche Bewertung des Einsatzes von batterieelektrischen Nutzfahrzeugen in der Distribution von Konsumgütern, Schriftenreihe Logistik der Technischen Universität Berlin, Band 37, Berlin, 2017.
- Schulte, Christof (2017): Logistik: Wege zur Optimierung der Supply Chain, 7. Auflage, München, 2017.

- Stan, Cornel (2012): *Alternative Antriebe für Automobile: Hybridsysteme, Brennstoffzellen, alternative Energieträger*, 3.Auflage, Berlin, 2012.
- Umweltbundesamt (2018 online): <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#textpart-1> (aufgerufen am 08.04.2019).
- VDA (o.J. online): <https://www.vda.de/de/themen/wirtschaftspolitik-und-infrastruktur/verkehr/gueterverkehr.html> (aufgerufen am 05.04.2019).
- VDA (2009 online): <https://www.vda.de/de/services/Publikationen/antriebe-und-kraftstoffe-der-zukunft.html> (aufgerufen am 09.04.2019).
- Vry, Wolfgang (2008): *Beschaffung und Logistik im Handelsbetrieb*, 1.Auflage, Ludwigshafen, 2008.
- Wachter, Katharina (2016): *Wettbewerbsstrategien zur erfolgreichen Markteinführung mit Fahrzeugen mit innovativen Antriebstechnologien*, 1.Auflage, Hamburg, 2016.
- Wagner, Henning / Maier, Reinhard / Schubert, Jürgen (2013): *Alternative Antriebe – E-Mobilität: Wie wird man Fachkundiger für Arbeiten an Hochvolt-Systemen im Kraftfahrzeug?*, 1.Auflage, Konstanz, 2013.
- Wietschel, Martin (2017): *Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potenziale des Hybrid-Oberleitungs-LKW: Studie im Rahmen der wissenschaftlichen Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie Fraunhofer ISI/IML*, 1.Auflage, Karlsruhe, 2017.
- zf-zukunftsstudie (2012 online): https://www.zf-zukunftsstudie.de/wp-content/uploads/2012/08/ZF_LKW_Studie_A.pdf (aufgerufen am 04.04.2019).