
2. Kurzfassung/ Abstract

2.1. Deutsch

Eine stetige Zunahme des Verkehrsaufkommens und die damit einhergehenden steigenden Emissionen durch Fahrzeuge zwingen die politischen Akteure dazu Maßnahmen zu entwickeln, um den Umweltauswirkungen dieses Wachstums entgegenzuwirken. Das eHighway Projekt ELISA kann als eine dieser Maßnahmen gewertet werden. Das Projekt beinhaltet den Bau und die Inbetriebnahme einer Teststrecke für Oberleitungs-Hybrid-LKW an der A5. Im Zuge dieses Projekts werden Forschungsfortschritte und Erfahrungen mit der neuen Technologie erwartet.

Ziel der Arbeit ist es einen Überblick über den aktuellen Stand der Technik der Energieversorgung schwerer Nutzfahrzeuge zu geben. Es sollen Entwicklungspfade der unterschiedlichen Technologien herausgearbeitet werden, um eine Bewertung dieser hinsichtlich der Reichweiten zu ermöglichen.

Der Streckenabschnitt zwischen Langen/Mörfelden und Darmstadt/Weiterstadt wurde für den Bau des Projekts ausgewählt, da Streckenabschnitte gewählt wurden, die repräsentativ für weitere Straßen im deutschen Verkehrsnetz gelten können. Die Fertigstellung des Baus ist für Herbst 2018 geplant. Anschließend folgt der Testbetrieb von fünf Oberleitungs-Hybrid-LKW. Der Bau des Projekts wird durch Forschungen der Technischen Universität Darmstadt betreut und es wird eine Fortsetzung der Forschung für den Testbetrieb erwartet. Das Projekt ist nicht das erste, das sich mit der Elektrifizierung des Schwerverkehrs beschäftigt, jedoch in Deutschland das erste, das eine Testung der Fahrzeuge auf öffentlich Straßen vorsieht.

Zu Beginn der Arbeit werden die Gewichte und Maße von Nutzfahrzeugen dargestellt, um die folgende Kategorisierung der Fahrzeuge zu ermöglichen. Bei der Kategorisierung der Fahrzeuge macht es Sinn, bestimmte Fahrzeuggewichte bestimmten Fahrprofilen zuzuordnen. Die Nutzfahrzeuge lassen sich vor dem Hintergrund in drei Kategorien aufteilen. Die Fahrzeuggruppe N1 sind Fahrzeuge bis maximal 3,5 Tonnen, die hauptsächlich im Nahverkehr verwendet werden. Die Nutzfahrzeuge der Klasse N2 bestehen aus Fahrzeugen im Regional- und Lieferverkehr deren Fahrzeuggesamtgewicht zwölf Tonnen nicht überschreitet und deren Fahrtenlängen in einem Bereich von 51 bis 150 Kilometern angenommen wird. Die für diese Arbeit zu betrachtende relevante Fahrzeuggruppe sind die Nutzfahrzeuge mit einem Fahrzeuggesamtgewicht größer als zwölf Tonnen, die überwiegend im Regional- und Fernverkehr eingesetzt werden. Diese Fahrzeuge können Kategorie N3 zugeordnet werden. Innerhalb dieser Fahrzeugkategorie sind die Sattelzugmaschinen hervorzuheben, die durch hohe Fahrleistungen und damit einhergehenden hohen Transportleistungen die relevanteste Gruppe der zu betrachtenden NFZ darstellen. Obwohl die Anzahl der Fahrzeuge in Kategorie N3 innerhalb der Nutzfahrzeuge im Vergleich zu leichteren Nutzfahrzeugen relativ gering ist, erbringt der Fernverkehr 67% der Transportleistung. Es gilt festzuhalten, dass alternative Antriebe stärkere Wachstumsraten zu verzeichnen haben als herkömmliche Antriebe.

Im weiteren Vorgehen wird der aktuelle Stand der Technik der Antriebstechnologien und ihrer Energieversorgung erläutert. Zunächst werden die unterschiedlichen Energiespeicher und Möglichkeiten der Energieversorgung von Fahrzeugen aufgeführt und erläutert. Hinsichtlich der Reichweiten der Fahrzeuge stellen Energie- und Leistungsdichte der Energiespeicher die wichtigsten Anforderungen dar. Kondensatoren besitzen hohe Leistungsdichten jedoch geringe Energiedichten und sind daher nicht als Hauptenergiequelle, sondern nur in Kombination mit weiteren Energiequellen zur fahrzeugseitigen Energieversorgung geeignet. Aufgrund ihrer Eigenschaften eignen diese sich gut für Bremskraftrückgewinnung und Hybridsysteme. Schwungradspeicher stellen im Bereich des Fernverkehrs keine geeignete Energiequelle dar, da sich diese nur bei vielseitiger Topologie oder urbanem Fahrprofil rentieren. Wenngleich in weiter Literatur und in dieser Arbeit oft von Fahrzeugbatterien die Rede ist, sind dennoch wiederaufladbare Akkumulatoren gemeint. Für NFZ gelten verschärfte Anforderungen an die Batterien verglichen mit Batterien elektrischer PKW, da diese einer wesentlich intensiveren Beanspruchung ausgesetzt sind und höhere Leistungen erbringen müssen. Die Eigenschaften von Batterien hängen vom Einsatz der Materialien sowie vom Aufbau der Zellen ab. Je empfindlicher eine Batterie, desto notwendiger ist ein Batteriemanagement, das verschiedene Faktoren überwacht und steuert, um die Sicherheit und Lebensdauer einer Batterie zu gewährleisten. Nach derzeitigem Entwicklungsstand scheinen Lithium-Ionen-Batterien vielversprechende Entwicklungspotentiale zu besitzen. Diese zeichnen sich durch hohe Energiedichten aus und sind daher für den Einsatz in Fahrzeugen geeignet. Es ist zukünftig von einer Verdopplung der Kapazitäten bei gleichbleibendem Gewicht auszugehen. Es existieren weitere Batteriekonzepte, die sich derzeit noch in der Entwicklungsphase befinden, die die Beladungsproblematik durch eine mechanische Beladung, beispielsweise durch Tausch des Elektrolyt, umgehen,

um somit Zeitersparnis zu erreichen. Es ist nicht genau absehbar wann, ob und von welcher Technologie Lithium-Ionen-Batterien abgelöst werden.

Eine europäische Standardisierung der Ladeanschlüsse für batteriebetriebene Fahrzeuge ist bereits geschehen. So lassen sich Anschlüsse für das Laden mit Gleich- und Wechselstrom vorfinden, die differente Leistungübertragungen aufweisen. Oberleitungen stellen eine dynamische konduktive Lademöglichkeit dar. Des Weiteren existieren induktive Ladesysteme, die jedoch aufgrund niedriger Übertragungsleistungen und hoher Kosten nur eine untergeordnete Rolle für Nutzfahrzeuge haben.

Kraftstoffe sind bislang im Verkehrssektor als Energielieferant für Fahrzeuge des N3 Segments unverzichtbar. Sie lassen sich unterteilen in alternative fossilbasierte Kraftstoffe und biologisch gewonnene Kraftstoffe. Alternative fossilbasierte Kraftstoffe sind beispielsweise Erdgas und Autogas wobei die Motoren meist modifiziert werden müssen. Diese Kraftstoffe werden keineswegs eine komplette Dekarbonisierung des Verkehrs ermöglichen, jedoch weisen manche Kraftstoffe geringere Schadstoffemissionen auf. Zu biologisch gewonnen Kraftstoffen werden nicht nur pflanzenbasierte Kraftstoffe gezählt, sondern in dieser Arbeit ebenfalls die mittels Energie herstellbaren Kraftstoffe, da von einem Ausbau der erneuerbaren Energien ausgegangen wird, und diese somit klimaneutral erzeugt werden könnten. Wasserstoff nimmt aufgrund des hohen gravimetrischen Energieinhalts eine Sonderrolle ein und ist gut zur Umsetzung in einer Brennstoffzelle geeignet. Die Speicherproblematik des Wasserstoffs und die hohen Kosten des Antriebs stehen momentan einem Einsatz im Fernverkehr im Weg. Zudem besteht noch keine ausreichende Infrastruktur.

Geringe Energiedichten von Kraftstoffen oder Energiespeichern führen dazu, dass für dieselähnliche Reichweiten mehr Gewicht und Volumen im Nutzfahrzeug beansprucht werden muss.

Verbrennungsmotoren stellen für Nutzfahrzeuge nach heutigem Stand in Bezug auf die Reichweiten weiterhin das geeignetste Antriebskonzept dar. Diese Eignung lässt sich nicht auf die Energieeffizienz der Motoren, sondern auf die hohen Energiedichten der fossilen Kraftstoffe zurückführen. Elektromotoren weisen wesentlich höhere Wirkungsgrade auf, sind jedoch, aufgrund der Nachteile der Energiespeicher, noch nicht für große Reichweiten geeignet. Die wasserstoffbetriebene Brennstoffzelle stellt hinsichtlich der mobilen Erzeugung von Strom die überlegene Technologie dar. Derzeit besteht für Brennstoffzellen Fahrzeuge weder Angebot noch Infrastruktur.

Hybridkonzepte bieten die Möglichkeit, verschiedene Vorteile unterschiedlicher Antriebskonzepte sinnvoll miteinander zu kombinieren. Je nach Fahrprofil und Fahrzeugart können unterschiedliche Hybridisierungen eingesetzt werden, um Kraftstoffeinsparungen zu erzielen und somit die Effizienz der Fahrzeuge zu steigern. Hybridkonzepte können beim Übergang zu alternativen Antriebstechnologien eine wichtige Brückentechnologie darstellen, bis elektrisch basierte Antriebe keine Einschränkungen mehr aufweisen.

Da alternative Antriebe meist auf verschiedenen Kraftstoffen basieren, ist die Verteilung dieser mittels einer geeigneten Infrastruktur notwendig. In Bezug auf den Ausbau der Kraftstoffversorgung besteht das Problem, dass diese Infrastruktur vorfinanziert werden muss, da sonst entweder keine Fahrzeuge aufgrund mangelnder Infrastruktur gekauft würden, oder keine Infrastruktur aufgrund mangelnder Fahrzeugzahl ausgebaut würde.

Die zuvor erläuterten Energiespeicher werden in einem weiteren Schritt mit den jeweiligen Energiewandlern in Verbindung gebracht. Dabei wird betrachtet, welches Antriebskonzept bezogen auf das Gewicht und Volumen des Gesamtspeichersystems die besten Reichweiten ermöglicht. Dieselmotoren scheinen sich erneut aufgrund der hohen Energieinhalte der fossilen Energieträger als Antrieb für den Fernverkehr zu eignen. Fahrzeuge, die auf die Betankung von verflüssigtem Erdgas (LNG LKW) angewiesen sind, ermöglichen bereits heute brauchbare Reichweiten, wenngleich dafür größere Tankvolumina im Fahrzeug beansprucht werden. Batterieelektrische und wasserstoffbasierte Antriebe weisen prinzipiell eine gute Energieeffizienz auf, jedoch sind die dafür benötigten Energieträger entweder schwer, oder nicht gut transportierbar. Hinsichtlich der Emissionen der verschiedenen Antriebe gilt es zu verstehen, dass die Emissionen elektrisch basierter Antriebe ausschließlich in den Herstellungsprozessen des Stroms anfallen. Diesel LKW erbringen den größten Anteil ihrer Emissionen bei der Energieumwandlung im Verbrennungsmotor und sind in Bezug auf den Schadstoffausstoß wesentlich schädlicher als elektrische Fahrzeuge.

Es werden folgende Antriebe in verschiedenen Kategorien im Vergleich zum Diesel LKW bewertet. Dieser wird als Benchmark gesetzt, da er für den Fernverkehr die dominierende Technologie darstellt. Es werden LNG LKW, batterieelektrische LKW, wasserstoffbasierte Brennstoffzellen LKW und Oberleitungs-Hybrid-LKW mit Diesel LKW verglichen. Hierbei werden die Faktoren Reichweite, Ladedauer, Umwelteinflüsse, Infrastruktur und Kosten berücksichtigt. Des Weiteren werden die selbigen Faktoren erneut in Bezug auf das Entwicklungspotential der Fahrzeuge verglichen mit dem Entwicklungspotential der Diesel LKW bewertet. Nach aktuellem Stand der Technik weisen Diesel LKW die besten und batterieelektrische LKW die schlechtesten Eigenschaften auf. Dies spiegelt sich auch in der aktuellen Fahrzeugsituation wieder. Wenn die

Entwicklungspotentiale der Technologien betrachtet werden, stellt sich heraus, dass Oberleitungs-Hybrid-LKW die größten Potentiale aufzeigen. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass die Fahrzeuge durch ihre Hybridisierung die Flexibilität fossiler Antriebe mit den Entwicklungspotentialen alternativer Technologien kombinieren. Sie profitieren sowohl vom Ausbau der Infrastruktur, als auch von den zu erwartenden Fortschritten in der Batterietechnologie.

Zusammenfassend kristallisiert sich heraus, dass die Forschung im Bereich der alternativen Antriebstechnologien große Fortschritte macht, dennoch der Dieselmotor als Antriebstechnologie für den Fernverkehr mittelfristig unverzichtbar bleibt. Wenn man von einem Ausbau der Infrastrukturen alternativer Kraftstoffe ausgeht, so bieten diese Potential als Range-Extender in Hybridfahrzeugen zum Einsatz kommen zu können. Für das ELISA Projekt und die dort geplanten Oberleitungs-Hybrid-LKW kann dies eine Alternative bieten. Derzeit werden die LKW bei Entkopplung von der Oberleitungsinfrastruktur und entleerten Batterien von einem Dieselmotor angetrieben und können daher als dieselektrische Serielle-Hybride gelten. Da die Reichweiten des elektrischen Fahrens zunehmen werden, wird ein Range-Extender immer seltener zum Einsatz kommen müssen. Dies ermöglicht größere Abstände der Betankungsinfrastrukturen und der Oberleitungen und vereinfacht den Ausbau einer Fernverkehrselektrifizierung. Zudem können durch einen alternativ basierten Range-Extender weiterhin Emissionen eingespart werden.

Es bedarf weiterer Forschung auf allen Gebieten der Energieversorgung und Antriebstechnologien der Fahrzeuge, da bislang nicht eindeutig absehbar ist, welche Technologie sich langfristig durchsetzen wird.

2.2. English

A steady increase in traffic and the accompanying increase in emissions from vehicles are forcing policy makers to take action to counteract the environmental impact of this growth. The eHighway project ELISA can be considered as one of these measures. The project includes the construction and commissioning of a test track for hybrid trolley truck on the A5. As part of this project, research advances and experience with the new technology are expected.

The aim of this work is to provide an overview of the current state of technology of the energy supply of heavy commercial vehicles. Development paths of the different technologies are to be worked out in order to allow an evaluation of these in terms of reach.

The section between Langen / Mörfelden and Darmstadt / Weiterstadt was chosen for the construction of the project, as sections of the route were selected that could be representative of other roads in the German transport network. Completion of the construction is planned for autumn 2018. This is followed by the test operation of five hybrid trolley trucks. The construction of the project will be supervised by research of the Technical University of Darmstadt and a continuation of the research for the test operation is expected. The project is not the first to deal with the electrification of heavy transport, but is the first in Germany to test vehicles on public roads.

At the beginning of the work, the weights and dimensions of commercial vehicles are presented to allow the following categorization of the vehicles. When categorizing the vehicles, it makes sense to assign certain vehicle weights to specific driving profiles. Commercial vehicles can be divided into three categories considering the background of this work. The vehicle group N1 are vehicles up to a maximum of 3.5 tons, which are mainly used in local traffic. Commercial vehicles of category N2 consist of vehicles in regional and delivery traffic whose gross vehicle weight does not exceed twelve tonnes and whose journey lengths are assumed to be in the range of 51 to 150 kilometers. The relevant vehicle group to be considered for this work are commercial vehicles with a gross vehicle weight of more than twelve tonnes, which are mainly used in regional and long-distance traffic. These vehicles can be assigned to category N3. Within this vehicle category, the semitrailer trucks are to be highlighted, which represent the most relevant group of commercial vehicles to be considered because of their high driving performance and associated high transport performance. Although the number of vehicles in category N3 within commercial vehicles is relatively low compared to lighter commercial vehicles, long-distance transport accounts for 67% of transport capacity. It should be noted that alternative drive systems have higher growth rates than conventional drives.

The further procedure explains the current state of the art in drive technologies and their energy supply. First, the different energy storage and possibilities of power supply of vehicles are listed and explained. Regarding the ranges of the vehicles power density and output density of the energy storage are the most important requirements. Capacitors have high output densities but low power densities and are therefore not suitable as the main energy source, but only in combination with other energy sources for on-board power supply. Due to

their characteristics, these are well suited for brake power recovery and hybrid systems. Flywheel accumulators are not an appropriate source of energy for long-haul traffic, as they only pay off if they have a versatile topology or urban driving profile. For commercial vehicles more stringent requirements apply to the batteries compared to batteries of electric cars, as they are exposed to a much more intense stress and have to provide higher performance. The characteristics of batteries depend on the use of the materials and the structure of the cells. The more sensitive a battery, the more necessary is battery management system that monitors and controls various factors to ensure the safety and longevity of a battery. According to the current state of the development, lithium-ion batteries seem to have promising development potential. These are characterized by high power densities and are therefore suitable for use in vehicles. In the future, a doubling of capacities with constant weight is to be assumed. There are other battery concepts that are currently still in the development phase, which bypass the loading problem by a mechanical loading, for example by exchange of the electrolyte, so as to achieve time savings. It is not clear when, if and by what technology lithium-ion batteries will be replaced.

A European standardization of the charging connections has already been made. Thus, there are terminals for charging with direct and alternating current, which have different power transmissions. Catenaries represent a dynamic conductive charging option. Furthermore, there are inductive charging systems, but due to low transmission rates and high costs they have only a minor role for commercial vehicles. Until now, fuels have been indispensable in the transport sector as an energy supplier for vehicles in the N3 segment. They can be subdivided into alternative fossil-based fuels and biofuels. Alternative fossil fuels are, for example, natural gas and LPG, whereby the engines usually have to be modified. These fuels will by no means allow complete decarbonization of transport, but some fuels have lower pollutant emissions. Biofuels do not only consist of plant-based fuels, but also fuels that can be produced by energy, since it is assumed that renewable energies will be expanded, which would make their production carbon-neutral. Hydrogen occupies a special role due to the high gravimetric energy content and is well suited for conversion into a fuel cell. The storage problems of hydrogen and the high cost of the drive currently bar the way to use in long-distance transport. In addition, there is still no infrastructure.


Low energy densities of fuels or energy storage implies that more weight and volume in the commercial vehicle must be claimed for diesel-like ranges.

Combustion engines continue to represent the best drive concept for commercial vehicles in terms of range. This suitability cannot be attributed to the energy efficiency of the engines, but to the high energy densities of fossil fuels. Electric motors have much higher efficiencies, but are not yet suitable for long ranges due to the disadvantages of energy storage. The hydrogen fuel cell is the superior technology in terms of mobile generation of electricity. Currently fuel cell vehicles have neither supply nor infrastructure.

Hybrid concepts offer the useful possibility of combining different advantages of different drive concepts. Depending on the driving profile and vehicle type, different hybridisations can be used to achieve fuel savings and thus increase the efficiency of the vehicles. Hybrid concepts can be an important bridge technology when transitioning to alternative drive technologies until electrically based drives are no longer constrained. Since alternative drives are usually based on different fuels, the distribution of these is necessary by means of a suitable infrastructure. With regard to the development of fuel supply, the problem is that this infrastructure must be pre-financed, otherwise either no vehicles would be purchased due to a lack of infrastructure or infrastructure would not be developed due to a lack of vehicles.

The previously explained energy storage are in a further step related with the respective energy converters. It is considered which drive concept based on the weight and volume of the total storage system allows the best ranges. Diesel engines once again appear to be suitable for long-distance transport due to the high energy content of fossil fuels. Vehicles that rely on refueling liquefied natural gas (LNG truck) are already making it possible to reach usable ranges today, even though this requires larger tank volumes in the vehicle. Battery-electric and hydrogen-based drives have in principle a good energy efficiency, but the energy sources required for it are either heavy, or not easy to transport. With regard to the emissions of the different drives, it is to be understood that the emissions of electrically based drives are generated exclusively in the manufacturing processes of the electricity. Diesel trucks account for the largest proportion of their emissions in energy conversion in internal combustion engines and account in general for much higher emissions than electric vehicles.

The following engines are rated in different categories compared to diesel trucks. These are set as a benchmark because it represents the dominant technology for long-distance traffic. Described below are comparisons of LNG trucks, battery electric trucks, hydrogen-based fuel cell trucks and trolley hybrid trucks with diesel trucks. The factors of range, charging duration, environmental influences, infrastructure and costs are taken into account. Furthermore, the same factors are again evaluated in terms of the development potential of the vehicles



compared with the development potential of the diesel truck. According to the current state of the art diesel trucks have the best and battery electric trucks the worst features. This is also reflected in the current vehicle situation. When considering the development potential of the technologies, it turns out that trolley hybrid trucks have the greatest potential. Among other things, this is due to the fact that the hybridisation of vehicles combines the flexibility of fossil propulsion systems with the development potential of alternative technologies. They benefit both from the expansion of the infrastructure and from the expected advances in battery technology.

In summary, research into alternative propulsion technologies is making great strides, yet the diesel engine remains indispensable as a long-distance propulsion technology in the medium term. If one assumes an expansion of the infrastructures of alternative fuels, then these potentials can be used as range extenders in hybrid vehicles. For the ELISA project and the planned hybrid trolley trucks, this can offer an alternative. Currently, the trucks are powered by a diesel generator when decoupled from the overhead line infrastructure and depleted batteries and can therefore be considered diesel-electric serial hybrids. As the range of electric driving increases, a range extender will have to be used less and less frequently. This allows for greater distance between refueling infrastructures and overhead lines and simplifies the development of long-distance electrical transmission. In addition, an alternatively based range extender can continue to save emissions. There is a need for further research in all areas of energy supply and propulsion technologies of vehicles, as it is not clear yet which technology will prevail in long term.