

---

## Kurzfassung

Name: Paul Sohn

**Thema: Entwicklung eines Verfahrens zur Ermittlung von Emissionsminderungspotentialen durch den Einsatz von Oberleitungshybrid-Lkw im Güterfernverkehr**

---

Der Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung sieht eine umfangreiche Strategie für die Erreichung der erklärten Klimaschutzziele für die nächsten Jahrzehnte vor. Zur Einhaltung der Vorgaben sind unterschiedliche Maßnahmen für die Hauptakteure formuliert und Ziele festgelegt worden. Der Verkehr, als einer der Hauptverursacher in Bezug auf Endenergieverbrauch und THG-Emissionen, konnte in den letzten Jahren kaum positive Entwicklungen bei der Einsparung der Energie und Emissionen erzielen. In Hinblick auf weiter steigende Verkehrsleistungen sind schnell innovative Lösungen zu erforschen und erproben, um die Klimaziele nicht zu gefährden. Eine von vielen möglichen Lösungsansätzen stellt dabei die Elektrifizierung der Fahrzeugflotten im Straßenverkehr dar. Seit 2010 wird durch die Siemens AG das Forschungsprojekt zur Nutzung von Oberleitungen im Straßengüterverkehr vorangetrieben. Aus dem Forschungsansatz konnte 2018 im Rahmen des Projekts ELISA an der Bundesautobahn A5 zwischen Darmstadt und Frankfurt die erste Oberleitungs-Teststrecke auf deutschen Autobahnen erfolgreich installiert werden. Inzwischen läuft die Testphase mit mehreren Logistikunternehmen, die im realen Betrieb, die Nutzung der Oberleitung erproben sollen. Die TU Darmstadt ist als Forschungsbegleiter an dem Projekt beteiligt.

Eine der zentralen Fragen bei der Erforschung der Oberleitungsinfrastruktur sind die Höhe der Emissionsminderungspotentiale, die durch den Einsatz von Oberleitungs-Lkw im Vergleich zu aktuellen konventionellen Fahrzeugen entstehen können. Diese Arbeit soll die Grundlage für diese Forschungsfrage mit der Entwicklung eines Berechnungsverfahrens zur Ermittlung der Emissionsminderungspotentiale liefern.

Zunächst werden die grundlegenden Informationen zum Güterfernverkehr, dem aktuellen Stand der Fahrzeugtechnik, den Unterschieden zwischen konventionellen und alternativen Antriebstechnologien und den relevanten Emissionen mittels einer Literaturrecherche gewonnen.

Der Güterfernverkehr wird bezogen auf die jährliche Fahrleistung pro Fahrzeug und Endenergieverbrauch von Sattelzugmaschinen dominiert. Diese bieten daher durch die Forschung von innovativen Ansätzen das größte Potential zur Einsparung von Energie und Kraftstoffen. Vor allem da der genutzte Antrieb für Sattelzugmaschinen bis auf wenige Ausnahmen durch den Diesel-Motor bereitgestellt wird.

Der Diesel-Motor stellt mit dem Otto-Motor als klassischer Verbrennungsmotor die konventionelle Antriebstechnologie, die den größten Anteil in den heute genutzten Straßenfahrzeugen darstellt. Der konventionelle Antriebsstrang besteht i.d.R. aus einem Verbrennungsmotor, einer Kupplung, dem Getriebe und Wellen, die die Leistung des Motors an die Räder weiterleiten. Die Anordnung des Antriebsstrangs hängt dabei stark vom Nutzungsprofil des Fahrzeugs ab. Für Nutzfahrzeuge wird in der Regel ein Hinterradantrieb eingesetzt.

Der Bedarf an der Optimierung von konventionellen Antrieben fußt auf den zum Teil schlechten Wirkungsgraden. Das Entwicklungsfeld der alternative Antriebstechnologien versucht daher an unterschiedlichen Aspekten des Antriebsstrangs anzusetzen und zu optimieren. Alternative Antriebstechnologien hängen unter anderem mit dem Einsatz von Elektromotoren zusammen. Dabei kann der Elektromotor den Verbrennungsmotor komplett ersetzen. In diesem Fall spricht man von elektrischen Antrieben.

Im Falle einer Kombination beider Motortypen wird von einem hybriden Antrieb gesprochen. Die Einsatzmöglichkeiten des Elektromotors im hybriden Antrieb sind sehr vielfältig. Grundsätzlich werden

---

---

drei unterschiedliche Gruppen hybrider Antriebsstrangtechnologien kategorisiert: Der serielle Antriebsstrang sieht den Elektromotor als Hauptantrieb vor. Hierbei ist der Verbrennungsmotor komplett vom Antrieb abgekoppelt und ist nur für den Betrieb einer zweiten elektrischen Maschine- einem Generator- zuständig. Dadurch kann der Energiespeicher, der die elektrische Energie für den Elektromotor bereitstellt, während der Fahrt aufgeladen werden. Vorteilhaft ist dabei, dass der Verbrennungsmotor nicht abhängig von der Geschwindigkeit und damit der Drehzahl der Wellen ist und somit kraftstoffoptimal betrieben werden kann. Nachteil der seriellen Hybridantriebe sind die hohe Anzahl der Energiewandlungsprozesse. Zudem muss der Elektromotor relativ groß dimensioniert werden, um die geforderten Antriebsleistungen bereitstellen zu können. Dahingegen sieht der parallel Hybrid den Verbrennungsmotor weiterhin fest mit der Antriebsachse verbunden. Der Elektromotor ist i.d.R. an einem bestimmten Punkt im Antriebsstrang eingebaut und kann dadurch entweder allein oder in Kombination mit dem Verbrennungsmotor für die nötige Leistung sorgen.

Der Vorteil von hybriden Antrieben liegt vor allem in der Ausnutzung der Motoreigenschaften von beiden Motortypen. So hat der Verbrennungsmotor ein großer Nachteil beim Anfahren, da keine Leistung bei niedrigen Drehzahlen vorhanden ist. Dagegen ist der Elektromotor im niedrigen Drehzahlbereich sehr leistungsstark. Wie bereits angedeutet spielt der Betriebspunkt beim Verbrennungsmotor hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs eine große Rolle. Durch den Einsatz des Elektromotors kann dieser öfters erreicht werden.

Die Energiequellen der beiden Motoren unterscheiden sich deutlich und stellen vor allem für den Elektromotor ein großes Hindernis dar. Der Diesel-Motor nutzt Diesel-Kraftstoff, der, im Vergleich zu anderen Energiequellen, eine hohe Energiedichte aufweist. Dadurch kann mit relativem geringem Gewicht eine hohe Reichweite erzielt werden. Hingegen stellt der elektrochemische Energiespeicher eine sehr geringe Energiedichte, weshalb die Reichweiten für reine elektrische Fahrzeuge ohne Verbrennungsmotor gering sind. In Bezug auf den Güterverkehr spielt das Gesamtgewicht eine große Rolle weshalb der Einsatz von schweren Batterien zur Bereitstellung von hohen Reichweiten nicht effektiv ist. In dem Zusammenhang bietet die Oberleitungstechnologie die Möglichkeit das Batteriegewicht niedrig zu halten, da die Batterie während der Fahrt an der Oberleitung aufgeladen werden kann.

Der Einsatz von Oberleitungs-Lkw wurde, wie bereits erwähnt, in unterschiedlichen Forschungsprojekten getestet. Dabei wurden verschiedene Hybridtechnologien genutzt. Für das ELISA Projekt sind aktuell parallele Hybridantriebe im Einsatz und somit für das Berechnungsverfahren als untersuchte Fahrzeuge gesetzt. Die Fahrzeuge sind so umgerüstet, dass sie über einen Stromabnehmer die Energie aus der Oberleitung ziehen können. Bisherige Ergebnisse haben gezeigt, dass der Energieverbrauch durch den Einsatz von OH-Lkw gesenkt werden kann.

Der Abschluss der Grundlagen stellen die relevanten Emissionen und ihre Wirkungen auf Mensch und Umwelt dar. Die Entstehung der Emissionen sind auf nicht vollständige Verbrennungsprozesse im Motor zurückzuführen. Ein Minderungspotential der Emissionen entsteht also dadurch, dass der OH-Lkw den Verbrennungsmotor nicht betreiben muss.

Aus diesen Vorüberlegungen stellt das Berechnungsverfahren zwei wesentlichen Fragen. Zum einen muss der Betriebsstatus der Motoren ermittelt werden. Zum anderen muss die Emissionsentstehung im Motor modelliert werden. Letzteres kann mit Hilfe des Handbuches für Emissionsfaktoren (HBEFA) beantwortet werden. Das HBEFA ist eine Datenbank mit unterschiedlichen Emissionsfaktoren (EFA) für gegebene Fahrsituationen und Fahrzeugtypen.

Das Berechnungsverfahren wird in zwei Modelle aufgeteilt, die jeweils die oben formulierten Fragen beantworten sollen. Das Modell „Emissionen“ analysiert die Daten des HBEFA, während das Modell „Motorwahl“ den Betriebsstatus des Hybridfahrzeugs wiedergibt. Die Kopplung der beiden Modelle erfolgt über die gefahrene Geschwindigkeit. Das Modell „Emissionen“ gibt den vom Fahrzeugtyp und

---

---

gefahrenen Strecke abhängigen EFA aus. Wenn nach dem Modell „Motorwahl“ der Verbrennungsmotor aktiv ist, wird der EFA für das betrachtete Zeitintervall angerechnet. Durch die Aufsummierung der einzelnen Zeitabschnitte erfolgten die gesamten Emissionen des Fahrzeugs.

Für beide Modelle sind Angaben zum Streckenprofil und den untersuchten Fahrzeugen notwendig. Diese Eingangsdaten sind vor Berechnung des Verfahrens festzulegen. Dabei handelt es sich zum einen um ein Geschwindigkeitsprofil, ein Höhenprofil und ein Oberleitungsprofil. Zum anderen werden die fahrzeugspezifischen Daten, die zur Berechnung der Motorwahl benötigt werden, hinterlegt. Für dieses Modell werden drei konventionelle Diesel-Lkw mit unterschiedlichen Euro-Standards sowie zwei Konfigurationen paralleler OH-Lkw (mit unterschiedlichen Elektromotorgrößen) betrachtet.

Aus den Eingangsdaten können nun die relevanten Größen berechnet werden. Zum einen werden Abfrage IDs für die HBEFA-Daten bereitgestellt. Dadurch kann das Modell „Emissionen“ die relevanten Daten aus der Datenbank abrufen. Aus den Fahrprofilen werden Steigung und Beschleunigungen berechnet. Das Modell „Motorwahl“ berechnet die Fahrwiderstände, die am Fahrzeug angreifen. Dabei handelt es sich um Rollwiderstand, Luftwiderstand, Steigungswiderstand und Beschleunigungswiderstand. Für alle Widerstände sind unterschiedliche Parameter festzulegen. Mit der Kenntnis über die Kraftübertragung im Antriebsstrang kann das benötigte Drehmoment bei der gegebenen Drehzahl und die dadurch resultierende Leistung des Motors abgeschätzt werden. Dabei wird vereinfacht ein Gangwahl-Modell durchlaufen, damit die Drehzahlen und das Drehmoment an die Motorleistungen angeglichen werden. Durch die Angaben des benötigten Drehmoments und Leistung entscheidet ein Energiemanagement-Modell, in welchem Betriebsszenario das hybride Fahrzeug arbeitet. Dazu bedient sich dieser Berechnungsschritt der Angabe von Motorkennfelder des Verbrennungs- bzw. Elektromotors. Dadurch kann abgeschätzt werden, ob der Elektromotor allein oder in Kombination mit dem Verbrennungsmotor die abgefragte Leistung abgeben kann. Dabei wird auch der Status der Batterie abgefragt, da nur bei ausreichend vorhandener Energie der Elektromotor genutzt werden kann. Abhängig von der Wahl der Betriebsszenarios, wird die Batterie ent- oder beladen (z.B. durch Generatorbetrieb des Elektromotors). Sollte sich das Fahrzeug mit der Oberleitung verbinden, findet zudem die Aufladung der Batterie statt. Das Verfahren wird in festen Zeitabschnitten durchgerechnet. Für diese Zeitintervalle wird angenommen, dass die Eingangsdaten konstant bleiben.

Das Berechnungsverfahren wird in eine Simulationsumgebung integriert. Dazu wird das Simulationsprogramm „AnyLogic“ genutzt. Das Programm bietet eine Vielzahl von Funktionen, die es dem Nutzer leichter machen, komplexe Berechnungen und Abläufe zu simulieren. Die Nutzung von Agenten gestaltet die Entwicklung und Programmierung des Modells übersichtlicher.

Das Verfahren wird Anhand von realen Daten des OH-Lkw vereinfacht kalibriert und anschließend durch Abgleich mit Daten aus der Literatur teilvalidiert. Abschließend wird mit dem entwickelten Verfahren ausgewählte Szenarien berechnet und das Minderungspotential der OH-Lkw gegenüber konventioneller Lkw ermittelt. Dabei konnten für alle Szenarien Emissionsminderungspotentiale der OH-Lkw festgestellt werden. Die Variation der Eingangsdaten hatten dabei unterschiedliche Einflüsse auf die Ergebnisse. Diese Arbeit stellt nicht den Rahmen einer ganzheitlichen Auswertung und Analyse aller Wirkungszusammenhänge darzustellen.

Abschließend wurde eine Abschätzung des Einsparungspotential für den Fall eines Ausbaus des Oberleitungsnetzes durchgeführt. Dazu wurden Annahmen zur Entwicklung der Fahrzeugbestände im Jahr 2030 getroffen und ein Ausbau der Oberleitungsinfrastruktur von 30 % im deutschen Autobahnnetz angesetzt. Durch den Ausbau wurde ein Einsparungspotential von 17 % bei Kohlenstoffdioxid, 10 % bei Stickoxiden und 5 % bei Partikelmasse festgestellt.

---

---

## Abstract

Name: Paul Sohn

Topic: **Development of a procedure to determine the emission reduction potential through the use of overhead contact line hybrid trucks in long-distance freight traffic**

---

In the 2050 climate action plan the German government offers a comprehensive strategy for the coming years to be able to reach the necessary climate goals. In order to achieve the goals many policies have been drafted and specific targets have been set for the sectors most responsible for pollution and greenhouse gas emissions. The traffic sector is one of the major players for greenhouse gas emissions and has not yet shown any sign of decreasing its emissions. Because of the forecast of a strong increase in traffic over the next years, the traffic sector needs to be in an urgent search for new and innovative solutions to decrease energy consumption. One of many approaches is to electrify road vehicles. Since 2010 Siemens AG has been researching into using trolley systems or overhead contact lines to power hybrid heavy duty trucks.

As a follow up project, the first test track for overhead contact line hybrid in Germany has been set up as part of the ELISA project on the A5 between Darmstadt and Frankfurt. After finishing the construction of the overhead contact line system in 2018 the test track has been used by local transport companies to give the system a trial. TU Darmstadt is part of the research team for this project.

One of the main questions regarding the overhead contact line system is the emission reduction potential of the used hybrid trucks in comparison to conventional diesel trucks. By developing a procedure to determine the potential, this paper offers a basis to the research.

Long distance freight traffic is dominated by truck tractor. The high annual mileage per truck and consumption of fuel as well as the widespread usage of the diesel engines, the truck tractor offers a high optimization potential in freight traffic.

Diesel and gasoline engines together make up most of road traffic drive technology. The conventional drive train contains of a combustion engine, clutch, gear unit and drive shaft. The drive shaft conducts the torque from the combustion engine to the wheels. Drive train arrangements can differ and depend on the usage of the vehicle. Freight trucks usually are powered through the rear axis.

Conventional drive trains offer low efficiency factors. Alternative drive train technology tries to overcome the negative aspects of conventional drive trains by using electric engines in different aspects of the drive train. A full electric drive train is only powered by an electric engine. For a hybrid drive train both electric and combustion engine are used to power the vehicle.

There are three types of hybrid drive train arrangements. Serial hybrids contain of an electric engine as the drive unit. A combustion engine is separated from the drive train and located next to an electric generator. By running the combustion engine, the battery is charged through the generator. Because the combustion engine can run independently a higher efficiency can be met by the engine and consumption of fuel can be reduced. One of the negative aspects of the serial hybrid drive train is the multiple conversion of energy which leads to power losses. For the vehicle to function correctly, the electric engine must also be a lot stronger and therefore heavier.

A second option of hybrid drive train technology is offered by the parallel hybrid. The combustion engine is fabricated as it would be in a conventional drive train, directly connected with the drive shaft. The electric engine can be used in different ways to support the combustion engine. In a parallel hybrid setting both engines can be used at the same time or separately.

The main advantage of hybrid structures in drive train technology is the utilization of the advantages of both engines. During a run-up the combustion engine has a lot of efficiency losses while the electric

---

---

engine offers high torque for low engine speed. Using the electric engine as a generator the combustion engine can also be held in ideal settings in order to reduce fuel consumption.

On key difference between an electric and a conventional drive train is the energy source. Combustion engine use diesel fuel, which has a high energy density compared to other energy sources. Therefore, a relative high range is achieved by little weight. Using an electric energy source, the energy density is low which results in having low ranges or high battery weights. Empty vehicle weight plays a pivotal role for freight traffic. Therefore, a hybrid vehicle with higher weight not only reduces the weight capacity of the truck but also lowers the driving range. In this context having an overhead contact line system gives the opportunity to use smaller battery and at the same time not losing any range in comparison to the conventional drive train. The battery can be charged by the overhead contact line while driving.

As mentioned, over the past years many projects did testing of overhead contact line systems with different hybrid trucks. As a result, many studies suggest the efficiency gains by the overhead contact line technology. The ELISA project uses a parallel hybrid drive train which will be used to model an overhead contact line hybrid in this paper.

This paper not only looks at fuel or energy efficiency but especially tries to quantify different emissions which are result of imperfect combustion. A possible reduction in emissions can be achieved by using the electric engine only.

In conclusion the development of the procedure in this paper needs to address two different questions. On the one hand the usage of either the electric or combustion engine must be determined. On the other hand, the quantity of emissions produced by the combustion engine needs to be calculated. As for the quantity of emissions the Handbook Emission Factors for Road Transport (HBEFA) provides emission factors for all current vehicle and road categories as well as different traffic situations.

The procedure is split into two calculation models in order to determine the information of the two questions mentioned above. The model "Emissionen" will analyse the data of the HBEFA to provide the emission factor for a given speed and slope. The model "Motorwahl" tries to determine the operation status of the two engines. As a result, the information of both models is connected to calculate the emissions. If the hybrid truck must use the combustion engine the emission factor is calculated for that time interval. By adding each time intervals, the total emissions for a given route can be determined

For both models many parameters must be set before calculating. The route information (speed, slope and availability of an overhead contact line) and the information for the different vehicles need to be determined before running the calculation. The procedure in this paper will examine three conventional trucks (with different euro standard classes) as well as two different parallel hybrid trucks (with different electric engine power).

With the given input data, the procedure can calculate the needed information. An ID is set up in order to analyse the data provided by the HBEFA. With the route information the acceleration and the slope are calculated. The model "Motorwahl" will calculate the driving resistance, which contains rolling resistance, aerodynamic resistance, climbing resistance and acceleration resistance. Every aspect of the driving resistance has different parameters that need to be given. As a result, the driving resistance can be translated into the needed torque for the given engine speed. This is calculated through the loss and gear transmission ratios given by the drive train. The transmissions ratio is different depending on the used gear. Therefore, a gear selection model is used to determine the ideal gear selection. With the given torque and engine speed the needed engine power can be calculated. Comparing engine characteristic map of both combustion and electric engine a procedure decides the usage of the engines. If the needed torque and power can be met by the electric engine and the battery is able to provide the needed electric power, the hybrid truck will drive electric and the combustion engine is shut down. The state of the engine usage also effects the battery state of charge (SOC). While using the combustion engine and the

---

---

electric engine as a generator, the battery can be charged. If a connection with the overhead contact line is established, the battery will also be charged. The mentioned procedure is executed for a time interval in which all parameters are considered as constants.

The procedure is integrated into the simulation program “AnyLogic”. The program offers a wide variety of functions in order to keep complex calculations and processes simple. Agent based modulation is used for this procedure to arrange the development and programming of the model more clearly.

The procedure is calibrated by using real time driving data provided by the ELISA project. To validate the calibrated model in parts, data from different studies are compared to the model’s calculations.

Different scenarios are calculated with the given procedure to determine the emission reduction potential of overhead contact line hybrid in comparison to a conventional diesel truck. All scenarios show a potential in reducing the emissions by using overhead contact line hybrids.

Finally, an estimation of the reduction potential of emissions for a prospective future development of a nationwide grid of overhead contact line system is calculated. Assumptions were made for the hybrid fleet developments for the year 2030 as well as a 30 % state of implementation of overhead contact line system on German highways. The reduction potential of 17 % for carbon dioxide, 10 % of nitrogen oxide and 5 % of particle mass respectively was found.

---

