
Kurzfassung

Name: Regina Linke

Thema: Entwurf und Anwendung eines Modells zur Bewertung des Elektrifizierungspotentials von Autobahn-Teilstrecken mit Hilfe von Oberleitungen

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Manfred Boltze
M.Sc. Kevin Rolko

Der Güterverkehr, insbesondere der Straßengüterverkehr, ist ein zentraler Bestandteil moderner, arbeitsteiliger Volkswirtschaften. Die Verkehrsprognose zeigt, dass bis zum Jahr 2050 mit einem Anstieg des gesamtmodalen Güterverkehrsaufkommens um ca. die Hälfte des heutigen Aufkommens zu rechnen ist. Gleichzeitig wurden bei der Festlegung der Klimaschutzziele im Klimaschutzplan 2050 vom November 2016 der deutschen Bundesregierung eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 55% im Vergleich zu 1990 bis zum Jahr 2030 festgelegt. Für den Verkehrssektor bedeutet dies eine Senkung von Treibhausgasemissionen auf 95 bis 98 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente bis 2030. Ein zentraler Ansatzpunkt zur Senkung der Treibhausgasemissionen im Transportsektor liegt in der Elektrifizierung des Straßenverkehrs. Eine Möglichkeit zur Elektrifizierung sind Electric Road Systems (ERS), welche die dynamische Übertragung der Antriebsenergie auf Fahrzeuge ermöglichen. Grundsätzlich können bei der elektrischen Energieversorgung zwei Konzepte unterschieden werden: die externe Energieversorgung und die interne Energieversorgung bzw. On-Board Energieversorgung. Jedoch ist auch eine Kombination der beiden Energieversorgungen in einem modularen Hybridkonzept möglich, wie in dem neu entwickelten eHighway System. Das eHighway System ermöglicht, dass Hybrid-Oberleitungs-LKW über einen Pantographen Energie aus dem Oberleitungsnetz beziehen und im nachgeordneten Netz batteriebetrieben fahren können. Die Funktionalität des eHighway Systems wurde bereits in den Projekten ENUBA 1, ENUBA 2 und ELISA analysiert und wird derzeit durch Pilotprojekte auf deutschen Autobahnen getestet. Die Forschungsprojekte ENUBA 1 und 2 untersuchten insbesondere die technische Umsetzbarkeit und die Erprobung auf Versuchsstrecken. Eine Studie des Fraunhofer ISI analysierte die Machbarkeit des eHighway Systems im Hinblick auf das wirtschaftliche Potential von Hybrid-Oberleitungs-LKW in Deutschland. In diesem Zusammenhang ergibt sich neben der Prüfung der technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit die Frage, welche Teilstrecken der deutschen Fernstraßen für eine Ausstattung mit Oberleitungen besonders geeignet sind. Diese Arbeit bietet einen Lösungsansatz für diese Fragestellung. Ziel ist es, eine Bewertungsmethodik zur Überprüfung des Elektrifizierungspotentials von deutschen Autobahnen-Teilstrecken mit Hilfe von Oberleitungen zu entwickeln und in ein geeignetes Softwaretool zu implementieren.

Der erste Teil der Arbeit gibt ein Überblick über den Stand der Technik des eHighway Systems. Es werden die Systemkomponenten der Oberleitungsinfrastruktur, die Fahrzeugtechnologie von Hybridoberleitungs-LKW (HO-LKW) sowie der Prozess der Errichtung, des Betriebs und der Instandhaltung der Oberleitungsanlage erläutert. Außerdem werden Methoden der Verkehrsplanung wie die multikriterielle Verträglichkeitsprüfung und das Eliminationsverfahren, die Nutzwertanalyse, die

Kosten-Nutzen-Analyse und die Kosten-Wirksamkeitsanalyse vorgestellt und hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit auf das zu entwickelnde Bewertungssystem analysiert.

Zu Beginn des zweiten Teils der Arbeit wird das Gesamtkonzept zur Bewertung des Elektrifizierungspotentials von Autobahn-Teilstrecken vorgestellt. Aufgrund der Vielschichtigkeit der Bewertungsmethodik werden drei Bewertungsstufen gebildet: die Bewertung von Streckenelementen, die Zusammenfassung von Streckenelementen zu Teilstrecken und die Bewertung von Teilstrecken. In der ersten Stufe werden zur Bewertung die Gesamtlängen der Bundesautobahnen in Streckenelemente mit einer Länge von jeweils 50 m unterteilt. Die Streckenelementlänge basiert auf der Annahme, dass mit einem durchschnittlichen Mastabstand bei der eHighway Oberleitungsanlage von 40 bis 65 m gerechnet werden kann. Anschließend werden 30 Bewertungskriterien zur Bewertung von Streckenelementen hergeleitet. Diese gliedern sich in drei Kategorien: raumordnerische Kriterien, Flächenverfügbarkeitskriterien und bautechnische Kriterien. Die Bewertungskriterien werden dann in eine Bewertungsmatrix mit vier Bewertungsstufen übertragen. Für jede Bewertungsstufe und jedes Bewertungskriterium wird ein Grenzwert festgelegt. Bei der Anwendung des Bewertungssystems auf einen Netzausschnitt wird anschließend über den Vergleich der Charakteristika des Streckenelements und dem Grenzwert festgestellt, welchen Bewertungsfaktor das Streckenelement je Bewertungskriterium erhält. Durch eine Nutzwertanalyse wird jedem Bewertungskriterium ein Gewicht zugeordnet und es kann anschließend eine Gesamtbewertung über alle Bewertungskriterien ermittelt werden. Danach wird die Gesamtbewertung in ein Farbschema (grün, gelb, rot) transformiert. Die zweite Stufe der Bewertungsmethodik fasst Streckenelemente zu Teilstrecken zusammen. Dazu werden Informationen zur Kapazität der Traktionsbatterie der eLKW zusammengestellt und ein System entwickelt, mit dessen Hilfe eine Zusammenfassung der zuvor bewerteten Streckenelemente zu elektrifizierten Teilstrecken möglich ist. Die dritte Stufe der Bewertungsmethodik evaluiert hierauf die Teilstrecken mit Hilfe einer Kosten-Wirksamkeit-Analyse. Für die Kostenberechnung wird zusätzlich zu der Gesamtlänge der mit der Farbe „grün“ bewerteten Streckenelemente alle Streckenelemente benötigt, die „gelb“ oder „rot“ bewertet wurden und aufgrund zu geringer Teilstreckenlängen zusätzlich elektrifiziert werden müssen. Die Wirksamkeitsbestimmung ist eine Erweiterung der Nutzwertanalyse und es erfolgt eine Aufstellung von Kriterien zur Bewertung der Wirksamkeit. Alle nicht-monetarisierbaren Bewertungskriterien wurden daher zur Wirksamkeitsprüfung der Teilstrecken ermittelt. Hierzu zählen zum Beispiel die Auswirkungen auf die Reduktion von CO₂-Emissionen oder lokaler Emissionen sowie die Kalkulation der Nachfrage auf Basis von Fahrtenbeziehungen. Anschließend kann durch einen Vergleich des Kosten-Wirksamkeits-Verhältnisses von verschiedenen Ausbauvarianten die beste identifiziert werden.

Da eine rein methodische Bewertung der Streckenelemente und Teilstrecken nicht zielführend ist, wird im dritten Teil der Arbeit ein Simulationsmodellprototyp mit dem Softwaretool Anylogic entwickelt. Zu Beginn wird die Wahl der Entwicklungsumgebung und die Wahl des Netzausschnittes begründet. Das Bundesland Hessen wurde aufgrund der stark belasteten Bundesautobahnen und der Errichtung einer Pilotanlage in Hessen als geeigneter Netzausschnitt identifiziert. Für die Integration des

Bewertungssysteme in die Simulation wurden notwendige Daten zusammengestellt und der Datentyp festgelegt. Für diese Arbeit lagen nicht für alle Bewertungskriterien Daten vor, da es sich zum Teil um sehr sensible Daten handelt. Daher wurde in den Prototypen nur ein Teil der Bewertungskriterien von Streckenelementen integriert. Obwohl auch für die Zusammenfassung von Teilstrecken und deren Bewertung keine ausreichenden Daten vorlagen, wurde die Umsetzung in dieser Arbeit trotzdem theoretisch erläutert. Aufbauend auf die vorhandenen Daten wurde die Bewertungssystematik von Streckenelementen in mehreren Schritten in Anylogic implementiert. Anylogic verwendet eine objektorientierte Programmierung mit der Programmiersprache Java. Durch die Möglichkeit des „Drag and Drop“ von Elementen wird die Programmierung jedoch vereinfacht. So konnte das Bewertungssystem für Streckenelemente mit Hilfe der Integration von Funktionen, Collections, Variablen und Parametern umgesetzt werden. Sowohl die implementierten Daten als auch die Ergebnisse werden in einer georeferenzierten Karte visualisiert.

Der letzte Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Evaluation des Prototyps. Hierzu wurden vier Szenarien mit unterschiedlichen Eingangswerten für die Simulation gebildet. Aufgrund von langen Simulationslaufzeiten und fehlenden Daten wurden in der Simulation nur zwei Bewertungskriterien berücksichtigt. Das Szenario 1-SE simuliert die Bewertung von Streckenelementen unter bei einer Streckenelementlänge von 50 m. Für das Szenario 2-SE wurde die Länge der Streckenelemente auf 100 m erhöht. Um die Auswirkungen der Veränderung der Grenzwerte der Bewertungsmatrix zu evaluieren, wurden im Szenario 3-SE die Grenzwerte erhöht und verringert. Das vierte Szenario 4-SE überprüft die Auswirkungen einer Veränderung der Gewichtung der Bewertungskriterien auf das Gesamtergebnis. Die Ergebnisse der Szenarien zeigen, dass eine Veränderung der Eingangswerte keine nennenswerte Auswirkung auf die Bewertungen hat. Es werden für alle Szenarien mit einer Streckenelementlänge von 50 m insgesamt 28.701 Streckenelemente erzeugt. Die Bewertung variiert nur geringfügig zwischen den Szenarien. Die meisten Streckenelemente werden als Indikator für einen gutes Ausbaupotential mit der Farbe „grün“ bewertet und ca. 1,3 % mit der Farbe „rot“. Dieses Ergebnis ist jedoch noch nicht dazu geeignet, das Elektrifizierungspotenzial von Streckenelementen zu bewerten, da dies erst mit der Implementierung aller Bewertungskriterien möglich ist.

Aufgrund noch ausstehender Daten, die zur Erzielung eines repräsentativen Ergebnisses zu berücksichtigen wären, kann diese Arbeit zwar keine abschließende Evaluation der Autobahn-Teilstrecken präsentieren, dennoch bietet sie mit der Zusammenführung aller zur Verfügung stehender Daten und der Entwicklung einer Berechnungsmethodik erstmals und daher ein als grundlegend zu betrachtendes Instrument für die Bewertung des Elektrifizierungspotentials von Autobahn-Teilstrecken, welches in anschließenden Forschungsprojekten erweitert werden kann.

Abstract

Freight Transport, especially road haulage is central to modern and manufacturing society. Traffic forecasting shows that until 2050 the total freight transport volume will increase by almost half of today's freight transport volume. Simultaneously, with defining the climate protection goals for 2050 from November 2016 by the German federal government, has to reduce CO₂ emissions by 55% until 2030 compared to 1990. This implies the need to reduce CO₂ emissions to 95 to 98 Million tones CO₂-equivalent until 2030 for the road traffic sector. Therefore, a central approach is to reduce greenhouse gas emissions by electrifying the road traffic. One possibility of the electrification are electric road systems (ERS), which enable a dynamic transmission of operating power to vehicles. Basically, two concepts of electric energy supply can be differentiated: the external energy supply and the on-board energy supply. Furthermore, a combination of these two concepts in a modular hybrid concept is possible, as is shown by the newly developed eHighway system. The eHighway System enables the hybrid-catenary-truck to obtain energy from the catenary system through a pantograph and use the energy storage to drive in the subordinated network. The functionality of the eHighway System has been evaluated in multiple projects like ENUBA 1, ENUBA 2 and ELISA and is currently tested in multiple pilot projects on German highways. The research projects ENUBA 1 and 2 focused on the technical feasibility and the trial on test tracks. The study of the Fraunhofer ISI analyzes the feasibility of the eHighway system concerning the economic potential of hybrid-catenary trucks in Germany. In this context the question arises which sections of German highways are most suitable to be equipped with catenaries. This study addresses this question. The aim of the study is to develop an assessment methodology to review the electrification potential of German highway sections with catenaries and to implement it into a suitable software tool.

The first part of this study gives an overview of the state-of-art of the eHighway System. The main system components of the catenary infrastructure, the vehicle technology of hybrid-catenary-trucks as well as the process of building, operating and maintenance are described. Furthermore, traffic planning methods like the multicriterial impact assessment, the benefit analysis, the cost-benefit analysis and the cost-effectiveness analysis are introduced and evaluated, referring to the developed assessment methodology.

At the beginning of the second part of this study the overall concept to evaluate the electrification potential of highway sections is introduced. Because of the complexity of the assessment methodology, three evaluation steps are build: the evaluation of segments, the merger of segments to sections and the evaluation of sections. For the first evaluation step the total distance of highways is divided into 50 m segments. The assumption of 50 m is based on the average mast distance of the eHighway catenary system, which ranges from 40 to 65 m.

Afterwards 30 evaluation criteria for the evaluation of segments are derived. They are divided into three categories: regional planning measures, land availability and structural criterions. The evaluation criteria are transferred into a matrix with four different valuation levels. For every valuation level and every

evaluation criterion a threshold value is defined. When applying the evaluation system onto a section of a network the characteristics of the segment are compared to the threshold values to obtain the valuation level. Every evaluation criterion is assigned to a weight through the benefit analysis and finally gets transferred to a total evaluation of an evaluation criteria. The total evaluation is transformed into a color scheme (green, yellow, red) subsequently.

During the second evaluation step, sections are created from segments. For this purpose, information of the capacity of the trucks traction battery are aggregated and based on this information, a system to create electrified sections from segments is developed. The third step of the assessment methodology evaluates the sections using a cost-effectiveness analysis. For the cost calculation the information on the total length of segments with the evaluation “green” is needed and additionally the length for segments with the evaluation “red” or “yellow”. The effectiveness calculation is an extension of the benefit analysis and for the evaluation of the effectiveness criteria, e.g. the effect on the reduction of CO₂ emissions or local emissions as well as the calculation of the demand based on trip relations have to be set up. Subsequently with comparing the cost-effectiveness ratio of different roll-out versions the best one can be identified.

In the third part of this study a simulation model prototype with the software tool Anylogic is developed as a solely methodological approach is insufficient for the evaluation of segments and sections. At the beginning, the choice of the software tool and of the section of the network is justified. The state “Hessen” was identified as a representative section of a network because its highways are loaded with traffic and one of the pilot projects takes place in Hessen already. For the integration of the evaluation system into the simulation it was necessary to find data with the right datatype. In this study it was not possible to get data for every evaluation criterion because most of the data is very sensible. Therefore, just some of the evaluation criteria have been implemented into the prototype. Moreover, because no sufficient data was available the setup for sections and the evaluation of sections have not been integrated. However, the implementation has been theoretically developed in this study. On the basis of the known data with multiple steps the evaluation system for segments was implemented into Anylogic. Anylogic uses object-oriented programming with the programming language Java. Due to the possibility of the drag and drop system for elements, the programming part is simplified. The evaluation system was implemented using functions, collections, variables and parameters. The implemented data as well as the results are visualized in a georeferenced map.

The last part of this thesis concerns the evaluation of the prototype. For this, four scenarios with different input values were simulated. Because of long simulation runtime and missing data only two evaluation criteria for segments have been implemented. The scenario 1-SE simulates the evaluation of segments with a segment length of 50 m. For the second scenario 2-SE the segment length was increased to 100 m. To evaluate the impact of changing the threshold values of the evaluation matrix the thresholds were increased and decreased for the scenario 3-SE. The last scenario 4-SE shows the impact when changing the weights for evaluation criteria on the total evaluation of segments. In total the scenario results show

that even though the inputs have been changed no high impact on the total evaluation can be seen. For all scenarios with a segment length of 50 m 28.701 segments are created, with the evaluation changing only slightly between the different scenarios. Most of the segments are evaluated with the color “green” as an indicator for high viability for installing a catenary system and just 1.3 % with the color “red”.

Due to missing data which should be implemented to get a representative result this study cannot finally evaluate highway sections nevertheless this study provides a basic instrument to evaluate the potential of equipping highway sections with catenaries by bringing together available data and an evaluation methodology. This study can be a basis for further research.