

---

## Zusammenfassung

---

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, ein Modell für den Bedarf der Oberleitung-Ladestation der Fernbusse auf den deutschen Bundesautobahnen zu entwickeln. Um den Ausstattungsbedarf an Oberleitungs-Ladestationen abschätzen zu können, ist ein Modell mit Hilfe der Simulationsumgebung „AnyLogic“ erstellt worden.

In den folgenden Zusammenfassungen werden die notwendigen Schritte zur Ergebnisfindung dargestellt. Zudem werden die wichtigsten Ergebnisse und ihre Schlussfolgerungen aus der Arbeit vorgestellt.

Um dieses Modell zu entwickeln, ist diese Thesis in drei Schritte unterteilt. Beginnend mit den theoretischen Grundlagen zur Modellerstellung, ist im ersten Schritt dieser Masterthesis eine Literaturanalyse durchgeführt worden.

Zuerst wurde eine umfassende Systemanalyse des Fernbuslinienverkehrs durchgeführt. Neben einer kurzen Darstellung der Definition und der rechtlichen Grundlagen, wurden auch eine ausführliche Marktanalyse erstellt. Dazu gehört neben der Entwicklung im aktuellen Markt auch eine Analyse der Marktteilnehmer und ihrer aktuellen Position am Markt.

Seit der Liberalisierung des Fernbusmarktes kamen viele neue Anbieter und Investoren auf den Markt. Nach einer kurzen Einfindungsphase etablierten sich einige wenige Unternehmen, die durch Übernahmen oder Kooperation ihre Position verstärkt haben. Hervorzuheben ist die FlixBus GmbH, die mit einem Marktanteil von ca. 79 % der Fahrplankilometer im Jahr 2016 ein kleines Monopol auf dem Fernbusmarkt erschaffen, vor allem bei innerdeutschen Verbindungen. Der einzige derzeitige Konkurrent ist die Deutsche Bahn mit ihrer Tochtergesellschaft IC Bus, die ein Anteil von 14 % der Fahrplankilometer aufweisen kann. Jedoch verbindet der IC Bus nur wenige Strecken, vorwiegend die, die sowieso noch nicht über die Bahn bedient werden. Aus diesem Grund, wird für die Arbeit die FlixBus GmbH für die weitere Modellentwicklung bevorzugt.

Festzuhalten ist weiterhin, dass eine sehr positive Wachstumsentwicklung auf dem Fernbusmarkt stattfindet, die auch in den nächsten Jahren noch anhalten soll. Das Aufkommen soll pro Jahr um ca. 6 % steigen. Die erhöhte Belastung soll durch verbesserte Verbindungen und eine höhere Auslastung der Busse ausgeglichen werden. Abschließend ist festzustellen, dass der anfängliche Wachstumsschub mittlerweile wieder etwas abgeflacht ist, trotzdem zeigt die Analyse für die kommenden Jahre einen durchaus positiven Verlauf.

Bei der Analyse der Marktteilnehmer und der Fahrpläne, stellte sich heraus, dass sich die FlixBus GmbH auch bei den physisch eingerichteten Linien und bei der Anzahl der Fahrten von den anderen Unternehmen absetzt. Um das Modell zu erstellen, wurden zudem die Wochentage der Fahrpläne analysiert. Das Ergebnis der Auswertung liefert mit 688 Fahrten (17,9%) den Freitag als Spitzentag, da an diesem Tag die meisten Pendler unterwegs sind. Zudem wurde die durchschnittliche Auslastung im Fernbuslinienverkehr auf 60 % festgelegt.

In einem zweiten Abschnitt wird der aktuelle technische Stand dargestellt. Dazu gehört das eHighway System der Siemens AG, die aktuellen Fahrzeuge auf dem Markt und die Entwicklung der Batterien. Zudem wird ein Referenzbus erstellt, der für die spätere Modellerstellung als Standardkonfiguration dient.

Das eHighway-System besteht aus drei Kernkomponenten, der Energieversorgung, dem Stromabnehmer und der Hybridantriebstechnik. Die Energieversorgung wird, ähnlich wie bei der deutschen Bahn, durch Oberleitungen sichergestellt. Die Stromspeisung wird durch sogenannte Einspeisestationen realisiert, die in drei Kilometer Abständen die Oberleitung mit der nötigen Spannung versorgen. Der Stromabnehmer überträgt die Energie aus der Oberleitung zum Elektromotor durch einen sogenannten Pantographen, der je nach Verfügbarkeit der Oberleitung an -bzw. abbügeln kann. Die Hybridantriebstechnik ist eine klassische Kombination aus einem konventionellen Dieselmotor und einem Elektromotor, der je nach Batteriezustand zugeschaltet wird.

Bei der Analyse der aktuellen Fahrzeuge im Fernbusmarkt, stellt sich heraus, dass es noch keine marktreifen hybridbetriebenen Fernbusse gibt. Deshalb werden in dieser Arbeit alternative Fahrzeuge

---

vorgestellt, die bereits im Nahverkehr erfolgreich betrieben werden. Zudem werden Systemalternativen zur Oberleitung vorgestellt, wie z.B. die Stromschiene und das induktive Ladeverfahren.

Eine weitere Analyse zeigt den aktuellen Stand der FlixBus GmbH Fernbus-Flotte. Aus den dort erhobenen Daten wird anschließend ein Referenzbus erstellt, der für die Modellerstellung maßgebend ist. Dabei repräsentiert dieser Referenzbus ein Großteil der FlixBus GmbH Fahrzeuge. Für das Modell ist dieser Referenzbus als konventionelle und als hybridbetriebene Variante verfügbar.

Für die Modellberechnungen, die im Hintergrund ablaufen, werden zudem die benötigten Batteriekennzahlen benötigt. Das Ergebnis der Berechnung liefert, für den Standardfall mit einer 60 kWh Batteriekapazität und eine Laderate von üblichen 2 C, eine Ladezeit von 15 Minuten.

Im letzten Abschnitt der technischen Grundlagen werden die umweltrelevanten Aspekte analysiert. Die benötigten Treibhausemissionen werden in verschiedenen Varianten berechnet, die bei der Produktion, Verteilung und Verbrennung von Diesel entstehen. Um einen späteren Vergleich zu ermöglichen, wird die ganze Kette von „well-to-wheel“ analysiert. Zudem wird die Produktionskette der Stromerzeugung detailliert vorgestellt, zum einem für den deutschen Strommix, zum anderen für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien.

Die Berechnungen liefern ein CO<sub>2</sub>-Emissionswert von 986,35 g CO<sub>2</sub>/km für den konventionellen Dieselmotor, 481,5 g CO<sub>2</sub>/km für einen Elektromotor der mit Strom aus dem deutschen Strommix betrieben wird und 29 g CO<sub>2</sub>/km mit Strom aus erneuerbaren Energien. Der Verbrauch des Referenzbusses ergibt sich zu 0,9 kWh/km. Diese Daten werden miteinander verglichen und liefern eine Verbesserung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von bis zu maximal 97 %, gleichbedeutend mit 231.944 t CO<sub>2</sub> an absoluten Einsparungen im Jahr 2014.

Zudem werden die sonstigen Vor- und Nachteile einer Elektrifizierung des Fernbuslinienverkehrs diskutiert. Dazu gehören gesundheitliche Verbesserungen durch Minderungen von Feinstaub und Lärm in städtischen und urbanen Regionen. Zudem ist die Abkopplung vom Ölmarkt ein weiterer wichtiger Aspekt, der für eine Elektrifizierung des Verkehrs spricht.

Die Nachteile bestehen in den aktuellen hohen Investitionskosten, die ein solches Projekt hervorrufen. Zudem besteht der aktuelle deutsche Strommix nur aus 29,5 % aus erneuerbaren Energie, so dass ein Wechsel zurzeit noch keine großen Einsparungen einbringen. Weiterhin entstehen bei der Batterieproduktion für die Hybrid-Fahrzeuge bis zu 140 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro kWh Batteriekapazität. Ein deutlich zu hoher Wert für einen umweltfreundlichen Einsatz im Straßenverkehr.

In zweiten Schritt wird mit Hilfe der Simulationsumgebung „AnyLogic“ ein Modell entwickelt, welches zur Bestimmung der Lage der Oberleitungsstationen dient. Zuvor erfolgt eine kurze Definition des Modellierens und der Grundlagen. Zudem wird die Simulationssoftware AnyLogic und ihre vorteilhaften Eigenschaften bei der computeranimierten Simulation vorgestellt.

Im Hauptteil werden die wesentlichen Funktionen und die Systematik bzw. Logik des erstellten Modells vorgestellt. Dazu gehört die Vorstellung der Klassen bzw. Agenten sowie die Funktionen, Variablen und die wichtigsten Events.

Das Modell simuliert die Fahrten des erstellten Hybrid-Referenzbusses und bestimmt dadurch die Lage der Oberleitungs-Ladestationen. Dafür wird ein Netzmodell des existierenden Straßennetzes benötigt, welches die Bundesautobahnen darstellt, da nur dort die Oberleitungen erstellt werden können. Zudem werden aktuelle Fahrpläne der Fernbusverkehrsunternehmen in das System implementiert.

Die Berechnungen werden vor allem in dem Agenten „Batterie“ durchgeführt. Alle benötigten Daten und Werte werden dort gesammelt und in Funktionen verarbeitet. Die implementierte Batterie des modellierten Referenzbusses entscheidet durch den aktuellen Ladezeitpunkt, zu welchem Zeitpunkt er eine Oberleitungs-Ladestation benötigt. Nachfahrende Busse können dann, je nach Nutzereinstellung, eine mögliche Verlängerung der Oberleitungs-Ladestation anfordern. Zudem ist für den Nutzer vor dem Start der Simulation ein Eingabefeld implementiert. Dort können alle berechnungsrelevanten Werte modifiziert werden, so dass sich neue Stationen ergeben. Das Modell liefert am Ende der Simulation die Lage der Oberleitungs-Ladestation graphisch auf einer GIS-Karte. Zudem werden die wichtigsten Koordinaten der Stationen in eine Excel-Datei („Data.xlsx“) abgespeichert.

---

Aufgrund der während der Modellerstellung festgestellten erhöhten Rechenleistung und einer von „AnyLogic“ in ihren Möglichkeiten eingeschränkte studentische PLE-Version, kann nur eine bestimmte Anzahl von Agenten modelliert werden. Deshalb werden sich die Ergebnisse auf die Strecke von Freiburg nach München beschränken. Eine Empfehlung für das gesamte deutsche Autobahnnetz wird allerdings im Fazit gegeben.

Im dritten und abschließenden Schritt wird die genaue Lage, Position und Länge der Oberleitungs-Ladestationen ermittelt, die zur Abwicklung der Verkehre notwendig sind. In der Arbeit werden drei Varianten vorgestellt. Die Variante 1, in der alle Hybrid-Busse ohne Oberleitungen die Strecke zwischen Freiburg und München befahren, die Variante 2, ohne eine Verlängerung der Oberleitungs-Ladestationen durch nachfolgende Busse und Variante 3, die bereits bestehende Stationen durch Verlängerungen optimiert.

Die Ergebnisse der Simulation für die drei Varianten liefert einen prozentualen Anteil der Strecken im Dieselmotortrieb von 83,8 % (Variante 1), 30,5 % (Variante 2) und 29,3 % (Variante 3). Die dazugehörige Lage und Positionen kann entweder aus der Arbeit, dem Modell oder der Excel-Datei entnommen werden.

Zusätzlich wird am Ende dieser Arbeit eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, die Auswirkungen von Annahmen und Parametervariationen auf die Modellergebnisse analysiert. Beispielfähig werden in diesem Abschnitt die Batteriekapazität und die Laderate der Oberleitung im Modell geändert, um die Auswirkungen auf die Modellergebnisse zu analysieren. Diese beiden Parameter wurden aufgrund ihres Entwicklungspotenzial ausgewählt.

Bei einer Erhöhung der Batteriekapazität ergeben sich nicht zwangsläufig auch Verbesserungen in den Modellergebnissen. Einer Erhöhung der Kapazität kann nur zur Senkung der gesamten Oberleitungslänge beitragen. Sonstige Faktoren sind vor allem auch von der Lage der Oberleitungs-Ladestationen und dem Fahrplan der Busse abhängig.

Die Erhöhung der Laderate verhält sich sehr ähnlich zur Parametervariation der Batteriekapazität. Auch hier stellen sich keine ausschlaggebenden Verbesserungen ein. Nur ein Zusammenspiel bzw. Optimierung einzelner Komponenten führt zu einer für die Strecke optimalen Ergebnis.

Für die anschließende Auswertung wurde eine weitere vierte Variante erstellt, die genau diese Optimierungen aus der Sensitivitätsanalyse beinhaltet. Um eine Bewertung dieser vier Varianten zu erhalten wurde eine Kosten-Nutzen-Analyse durchgeführt. Das Ergebnis, für die auf 50 Jahre Lebensdauer kalkulierte Analyse, sind hohe Verluste in allen Szenarien mit Oberleitungs-Ladestationen. Die Ergebnisse sind aber nicht überraschend, da die Investitionskosten für die Oberleitungsinfrastruktur sehr hoch sind. Zudem sind die Nutzkosten schwer monetär bewertbar, trotz des Richtwertes des Umweltbundesamtes. Um eine vollständige Analyse zu erstellen, müssten auch Umweltfaktoren wie die Lärmbelastung, der Feinstaub und sonstige Emissionen (z.B. Stickoxide, Kohlenmonoxide) bewertet werden. Zudem ist eine alleinige Bewertung der Oberleitungs-Ladestation nicht möglich, da vor allem auch Lkws die Infrastruktur mitbenutzen können.

Wie die Arbeit zeigt, ist eine solche Investition zur Elektrifizierung des Fernbusverkehrs mit Oberleitungs-Ladestationen ohne weitere Standortuntersuchung und systemübergreifende Analysen nicht ohne weiteres sinnvoll. Um diese Frage eindeutig beantworten zu können, bedarf es weiterer Untersuchungen, die sich vor allem mit einer ausführlichen Analyse der Busse in Kombination mit den Lkws beschäftigt. Mit dem Blick auf die kommenden verkehrlichen Entwicklungen des Fernbusmarktes, sollte der Fernbus bei weitergehenden Betrachtungen nicht ganz vernachlässigt werden. Zudem müsste hinterfragt werden, in wie weit gesundheitliche Aspekte (z.B. durch Lärm, Feinstaub) monetär bewertbar sind. Eine allgemeine Empfehlung für Standorte für Oberleitungs-Ladestationen wird im Fazit dieser Arbeit dargestellt.

---

## Abstract

---

The aim of this given thesis is to develop a model for the demand of contact wire loading stations for long distance buses on German federal highways. To estimate the need for equipment, a model with the help of the simulation environment “AnyLogic” was made.

The following summary provides the necessary steps to find a solution. Furthermore, the most important results and their conclusions will be presented.

To develop this model, this thesis is divided into three steps. The first step of this master thesis was a literature review concerning the theoretical basics of modeling.

First of all, a comprehensive system analysis was carried out. Additionally to the definition and legal basics, a thorough market analysis was conducted. This includes to current developments as well as an analysis of the market players and their latest market position.

Ever since the liberalization of the long distance bus market, a lot of new providers and investors have entered the market. After a short orientation phase, only a few companies were able to establish themselves on the market. Moreover, they managed to reinforce their position because of takeovers and cooperations. Highlighted should be the FlixBus GmbH. With a market share of 79% of the covered kilometers in the year 2016, they managed to establish a small monopoly in the long distance bus sector, especially in the domestic German sector. The only current competitor is the Deutsche Bahn with its affiliated company IC Bus. They have a market share of 14%. However, IC Bahn does not offer many routes, mainly those that are not served by train already. Therefore, the FlixBus GmbH will be preferred for the development of the model.

Furthermore, it is noteworthy that a positive process of growth in the long distance bus market can currently be witnessed and is supposed to continue for the next years. The amount of buses is supposed to increase by 6% per year. This increase is to be compensated with better connections and a higher occupancy rate in the buses. Finally it has to be mentioned that the initial growth spurt has decreased. Nevertheless, the analysis predicts a positive progression for the upcoming years.

In the course of the analysis of the market participants and the timetables, it became apparent that the FlixBus GmbH set itself apart from the other companies, including established bus lines and the amount of journeys. The weekdays were also analysed to create the model. The result of the analysis shows that Friday (688 journeys = 17.9%) is the day of the week when long distance buses are frequented the most because of commuters. Additionally, the average occupancy rate was determined at 60%.

The second section provides the technical status quo. This includes the eHighway-System of the Siemens corporation, the current vehicles and the development of batteries. In addition to that, a reference bus will be issued which will serve as a standard configuration for the creation of the model.

The eHighway-System consists of three core components: the energy supply, the collector and the hybrid drive technology. The energy supply, similar to the Deutsche Bahn, is ensured via overhead wire. The power input is realised via so-called feed-in stations which feed the overhead wires with the needed potential.

The collector transfers the energy from the overhead wires to the electric engine via a so-called pantograph, which is able to dock and undock the overhead wire.

The hybrid drive technology is a classic combination between a conventional diesel engine and an electric engine, which can be engaged if necessary.

During the analysis of the current vehicles in the long distance bus sector it became apparent that there are no market-ready long distance hybrid buses. Therefore, alternative vehicles that are successfully used in local transport will be presented and alternatives for the overhead wire, such as the power railroad and the inductive charging method, will be introduced.

A further analysis shows the status quo of the FlixBus GmbH long distance bus fleet. A reference bus, which will be normative for the creation of the model, will be built from the ascertained data. This reference bus represents a majority of the FlixBus vehicles. It will be available as a conventional bus and a hybrid bus for this model.

---

For the model calculations, which proceed in the background, the required battery indexes are needed. The result of the calculations suggests, for the standard case with a 60 kWh battery capacity and a charging rate of 2 C, a charging time of 15 minutes.

In the last section of the technical basis the environmentally relevant aspects are analysed. The required greenhouse emissions will be calculated in different versions, which emerge in the production, dispersion and combustion of diesel. To allow a later comparison, the whole chain from “well-to-wheel” will be analyzed. Furthermore, the production chain of the electricity production will be presented in detail. On the one hand the German electricity mix and on the other hand the production from renewable energy sources.

The calculations provide CO<sub>2</sub> emissions of 968,35 g CO<sub>2</sub>/km for the conventional diesel engine, 481,5 g CO<sub>2</sub> /km for the electric engine which is operated with power from the German electricity mix and 29 g CO<sub>2</sub>/km with power from renewable energy sources. The consumption of the reference bus is 29 g CO<sub>2</sub>/km. This data will be evaluated and provides an improvement of CO<sub>2</sub> emissions of up to 97%, synonymous with 231.944 t CO<sub>2</sub> of absolute savings in the year 2014.

Additionally, the other pros and cons of electric long distance buses will be discussed. This includes health improvements because of the reduction of fine particles and the reduction of noise in urban regions. Besides, the decoupling from the oil market is another important argument for electric long distance buses.

Disadvantages are the high investment costs for such a project. Additionally, the German electricity mix consists of only 29.5% of renewable energy so that a change would not lead to big savings. Furthermore, during the production of the batteries for the hybrid vehicles up to 140 kg CO<sub>2</sub> equivalents per kWh battery capacity emerge. This is too much to be eco-friendly.

In the second step, with the help of the simulation environment “AnyLogic”, a model will be developed which helps with the determination of the location of the contact wire loading stations. Before that, a short definition of modeling and the basics will be given. Furthermore, the simulation software AnyLogic and its beneficial qualities concerning computer animated simulation will be presented.

In the main part the crucial functions and the systematization respectively logic of the designed model will be presented. This includes the introduction of the classes respectively agents as well as functions, variables and the most important events.

The model simulates journeys of the hybrid reference bus and determines the location of the contact wire loading stations. For that reason a power supply model of the existing road network, which represents the federal highway network, is needed since overhead wires can only be installed there. Furthermore, current timetables of long distance bus companies must be included as well.

The calculations will mainly be done in the agent “batteries”. All required data will be collected and processed there. The implemented battery of the reference bus decides when it needs a charging station on the basis of the current power level. Following buses can demand, depending on their settings, a possible extension of the contact wire loading stations. Moreover, there is an input field for the user before the start of the simulation. All the relevant data can be modified there so that new stations result. In the end the model provides the location of the contact wire loading stations on a GIS map. Additionally, the most important coordinates of the stations will be saved in an Excel-file („Data.xlsx“). Due to the increased processing power and a limited student PLE version of AnyLogic, only a limited amount of agents can be modeled. That is why the results only cover the route Freiburg-Munich. A recommendation for the whole German federal highway network will be given anyway in the conclusion. In the third and concluding step the exact location, position and length of the contact wire loading stations, which are necessary for the processing of the transport, will be determined. In this thesis three versions will be presented. In version 1 all hybrid buses drive between Freiburg and Munich without overhead wires. In version 2 there is no extension of contact wire loading stations because of following buses. In version 3 the already existing station is optimized because of extension.

---

The results of the simulation provide a percentagewise proportion of the routes covered with diesel power of 83.8% (Version 1), 30.5% (Version 2) and 29.3% (Version 3). The corresponding location and position can be found in the thesis, the model or the Excel-file.

Additionally, there is a sensitivity analysis at the end which analyses the impact of assumptions and the variation in parameters concerning the model results. Exemplary, the battery capacity and the charging rate of the overhead wire will be changed to analyse the effect on the model results. These two parameters were chosen because of their development potential.

With an increase in battery capacity, there are no inevitable improvements in the model results. An increase of capacity can only result in a decrease of the whole overhead wire length. Other factors mainly depend on the location of the contact wire loading stations and the timetables of the buses.

An increase of the charging rate is very similar to the parameter variation of battery capacity. There are no decisive improvements. Only an interaction respectively an optimizing of components leads to an ideal result.

For the following conclusion an additional fourth version was created. It contains the optimizations of the sensitivity analysis. In order to receive an evaluation of these four versions, a cost-benefit analysis was conducted. The result for this analysis (calculated for a duration of 50 years) is that there are high losses in all scenarios with contact wire loading stations. The results are not surprising because the investment costs for the overhead wire infrastructure are very high. Moreover, it is difficult to assess the usage charges. Environmental issues such as noise disturbance, fine particles and other emissions (nitrous gases, carbon monoxide) have to be taken into consideration as well. Furthermore, an evaluation of contact wire loading stations is not possible because trucks can use the infrastructure, too. This thesis shows that such an investment to electrify the long distance bus traffic with contact wire loading stations without further site investigation does not make much sense. To answer this question clearly, more investigations, which deal with both buses and trucks, are needed. With regard to the traffic-related development of the long distance bus market, the long distance bus should not be neglected in further observations. In addition to that, the question arises whether health issues such as noise or fine particles can be evaluated monetarily. A general recommendation for the location of contact wire loading stations will be depicted in the conclusion of this thesis.