

Neuartige Planungsprozesse für die Elektrifizierung von Nahverkehrsbusflotten

New planning processes for the electrification of bus fleets in urban public transport

Dipl.-Ing. Tamas Kurczveil, Technische Universität Braunschweig, Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik, Braunschweig, Deutschland, kurczveil@ifra.ing.tu-bs.de; Dr.-Ing. Lars Schnieder, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Verkehrssystemtechnik, Braunschweig, Deutschland, lars.schnieder@dlr.de

Kurzfassung

In der städtischen Verkehrsplanung ist die Förderung umweltfreundlicher Verkehrsarten gelebte Praxis. Die qualitätsgerechte Gestaltung der Angebotspalette des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) ermöglicht den Bürgern, ihre Mobilitätsbedürfnisse auch ohne eigenes Automobil flexibel zu befriedigen. Durch die Nutzung alternativer Antriebskonzepte leistet der ÖPNV einen weiteren Beitrag zu einer verringerten Emission von Schall und Luftschadstoffen. Dieser Paradigmenwechsel stellt die Betreiber bereits in der Planung ihres Verkehrssystems vor neuartige Herausforderungen. Dieser Beitrag stellt die verkehrs- und betriebsplanerischen Überlegungen im Vorfeld der Betriebsaufnahme induktiv geladener Linienbusse anhand eines Pilotvorhabens im Gebiet der kreisfreien Stadt Braunschweig dar.

Abstract

In urban transport planning the focus on environmentally friendly means of transportations is well-established practice. Consideration of quality aspects in transport planning allows citizens of urban conglomerations to fulfil their mobility needs without an own private car. With the use of alternative fuels public transport makes a significant contribution towards the reduced emission of noise and air pollutants. For public transport operators this paradigm shift brings new challenges for the planning of the transport system. This paper discusses considerations which have to be made in traffic planning and public transport planning prior to the start-up of operations of busses using inductive charging technology. The methodical approach introduced in this paper will be explained based on a real-world example of a bus with inductive charging technology operating in the city of Braunschweig (Germany).

1 Einführung

Das Personenbeförderungsgesetz (PBefG) als maßgebliche nationale Rechtsgrundlage des ÖPNV nennt als grundlegende Zielstellung des Betriebes öffentlicher Verkehrssysteme die wirtschaftliche Verkehrsgestaltung und die Vorhaltung eines zuverlässigen (betrieblich verfügbaren) Bedienungsangebotes. Diese beiden Ziele müssen bei technologischen Innovationen im Fuhrpark bedacht und anschließend im Betrieb auch langfristig erreicht werden. Die Wirtschaftlichkeit bezieht sich im Systemzusammenhang induktiv zu ladender Fahrzeuge sowohl auf die Infrastruktur als auch auf die Fahrzeuge. Hierbei bestehen Wechselwirkungen zwischen der fahrzeugseitigen Dimensionierung der Leistungselektronik und Antriebsaggregate und der infrastrukturseitigen Positionierung und Bemessung der Ladeeinrichtungen [1].

1.1 Einsatz elektrisch betriebener Busse als komplexes Planungsproblem

Im Zuge einer optimalen Systemgestaltung, insbesondere vor dem Hintergrund der langen betrieblichen Nutzungsdauer der Infrastruktureinrichtungen, kommt der Infrastrukturplanung (Positionierung und Dimensionierung) eine große Bedeutung zu. In der Planung muss die Ent-

scheidung zwischen punktförmig (z.B. Haltestellenbereiche) oder linienförmig (z.B. Busspuren) wirkende Ladeinfrastrukturen getroffen werden. Möglicherweise bietet sich auch die gemeinsame Nutzung vorhandener Energieversorgungsinfrastrukturen mit Straßenbahnen an [2]. Neben den technischen Aspekten und den infrastrukturellen Randbedingungen ist eine Optimierung hinsichtlich der Lebenszykluskosten ortsfester Ladeeinrichtungen und kompatibler Fahrzeuge erforderlich. Somit wird eine Abwägung zwischen erforderlichen Ladeinfrastrukturelementen und der Batterielebensdauer ermöglicht [3], wodurch eine Wechselwirkung zur Auslegung der Fahrzeuge und ihrer Komponenten besteht. Bei der Fahrzeugdimensionierung und -konzipierung ist die Batterie für elektrisch angetriebene Fahrzeuge die Schlüsselkomponente. Dies gilt sowohl hinsichtlich ihres erheblichen Anteils an den Fahrzeuginvestitionen als auch bezüglich der deutlichen Erhöhung des Fahrzeuggewichts. In der Entwicklung von Fahrzeugkonzepten ist im Sinne des Energiebedarfs so wenig Akkukapazität wie möglich vorzusehen, jedoch so viel wie nötig, um eine hohe Verfügbarkeit zu erzielen und folglich die Kundenzufriedenheit zu gewährleisten. Hierbei muss das betriebliche Einsatzprofil, (z.B. verkehrabhängig schwankende Fahrzyklen, variierende Fahrzeugmassen durch unterschiedliche Besetzungsgrade) beachtet werden.

1.2 Wirtschaftlichkeit und Fahrzeugverfügbarkeit im Linienbetrieb

Neben der Wirtschaftlichkeit der Verkehrserbringung müssen die Verkehrsunternehmen die mit der Annahme einer Linienkonzession übernommene Verpflichtung zur Aufrechterhaltung des Fahrgastbetriebes erfüllen. Die Betriebspflicht darf nicht durch „technische Experimente“ verletzt werden. Im Zuge eines aktuellen Forschungsvorhabens zum Einsatz induktiv geladener Fahrzeuge im Busverkehr wird daher ihre betriebliche Verfügbarkeit maximiert. Die Verfügbarkeit kann zum einen durch die Minimierung der Zeit des nicht-betriebsfähigen Zustands (down time) und zum anderen durch die Maximierung der Zeit des betriebsfähigen Zustands (up time) beeinflusst werden [4].

Um die *down time* zu minimieren, dürfen keine zusätzlichen Verlustzeiten im Betriebsablauf durch Ladevorgänge an den induktiven Ladeinfrastrukturen entstehen. In der Planung der Infrastruktur und des ÖPNV-Betriebes ist daher eine zeitliche Synchronisation von Ladezeiten mit den im Betrieb erfolgenden Fahrzeugstillständen erforderlich. Ansatzpunkte hierfür sind längere Haltestellenaufenthaltszeiten bei hohem Fahrgastwechsel oder bei Verfrühungen. Auch können Wartezeiten vor Lichtsignalanlagen mit Ladezeiten räumlich und zeitlich zusammenfallen. Hierfür muss dem Bus ein spezifischer Standort im öffentlichen Straßenraum (z.B. eine Buschleuse [5]) für einen Zeitraum exklusiv zugewiesen werden können. Das größte Potenzial bieten Kehr- und Wendezeiten an den Endhaltestellen. Ringlinien sind hierbei besonders geeignet, da die Kehr- und Wendezeiten im Gegensatz zu Durchmesser- oder Radiallinien immer an der gleichen Stelle erfolgen. Gegebenenfalls können bei der Strategieentwicklung auch im Fahrplan enthaltene Pufferzeiten für einen Verspätungsausgleich und taktbedingte Verlustzeiten bzw. Wartezeiten bis zur nächsten Abfahrt berücksichtigt werden. Gleiches gilt für Pausenzeiten des eingesetzten Personals, welche je nach Dienstplanregime ebenfalls einen erheblichen Anteil an der betrieblichen Einsatzzeit des Fahrzeugs haben [6].

Für die *Maximierung up time* ist insbesondere die Kapazität von Akkus maßgeblich. Diese ist aus technischen und betriebswirtschaftlichen Gründen (Lebenszykluskosten) begrenzt. Daher zielen Strategieoptionen auf die Maximierung der mit einer Ladung zurückgelegten Strecke und die Minimierung der Degradation des Energiespeichers ab. Ein hohes Potenzial bietet die Vermeidung unnötiger Fahr- und Bremsspiele (z.B. durch Priorisierung an Lichtsignalanlagen, Verkehr auf Busspuren, Auslassen nicht frequentierter Haltestellen in Schwachverkehrszeiten). Da auch die Nebenaggregate (wie z. B. Klimatechnik) einen erheblichen Energiebedarf aufweisen, kann auch hier durch die Betriebsoptimierung und intelligente Steuerung der Klimatechnik zusätzliches Energieeinsparpotenzial generiert werden [7].

Der entscheidende technologische Aspekt bei der Verfügbarkeit ergibt sich aus dem Verhältnis der Fahr- zur Ladezeit: Nur durch im Automobilsektor unüblich hohe Ladelleistungen können geringe Ladedauern sichergestellt werden, die wiederum den Dauereinsatz von elektrisch be-

triebenen Nutzfahrzeuge im Linienbetrieb ermöglichen. Die Strategiedefinition zur Maximierung der betrieblichen Verfügbarkeit ist insofern komplex, als dass alle zuvor genannten Zeitelemente im Betrieb einer z.T. erheblichen Schwankung unterliegen. Im Folgenden wird das zuvor dargestellte komplexe Optimierungsproblem durch ein mit empirischen Daten gestütztes Modell des Batterieladezustands beschrieben. Die Modellbildung des Akkula-dezustands ist die Grundlage der im weiteren Projektverlauf durchgeführten Optimierung des Laderegimes eingesetzter Fahrzeuge und der Platzierung von Ladeinfrastrukturelementen.

2 Modellbildung eines generischen Kinematikmodells für Elektrofahrzeuge

Grundlage für eine Optimierung des Energiemanagements induktiv geladener Elektrobusse ist die Wahl einer zu minimierenden Zielfunktion. Hierfür eignet sich, besonders in Hinblick auf Maßnahmen zur Optimierung des kollektiven städtischen Verkehrs, die für den Betrieb benötigte Energie. Derzeit sind noch keine Elektrobusse im flächendeckenden Einsatz, die eine ausreichende Messdatenbasis der im Betrieb benötigten Energie liefern können. Aus diesem Grund ist für die Ermittlung des Energieverbrauchs im Betrieb ein physikalisches Modell erforderlich, welches aus existierenden Datensätzen über Fahrzeugtrajektorien die erforderlichen Energiemengen berechnet [8]. Auf der Grundlage eines physikalischen Modells des Batterieladezustands werden eine anschließende Verortung der Ladeinfrastruktur im Liniennetz des ÖPNV-Betreibers sowie ihre Dimensionierung hinsichtlich der bereitzustellenden Leistung möglich. Das methodische Vorgehen erfolgte hierbei in den folgenden Schritten:

Schritt 1: Durchführung einer *strukturellen Modellbildung*. Hierbei wurde den grundlegenden physikalischen Zusammenhängen folgend die mechanische Fahrzeugenergie als Summe der kinetischen, potenziellen und rotatorischen Energie beschrieben.

Schritt 2: Der strukturelle Term wird *parametrisiert*. Die geschickte Wahl der Parameter ermöglicht eine Berechnung von Fahrzeugvariablen unter Berücksichtigung von Verlustanteilen.

Schritt 3: Bei der *Modellberechnung* wird das zuvor erstellte Modell auf der Grundlage einer vorgegebenen Referenztrajektorie des Fahrzeugherstellers berechnet.

Schritt 4: Ein *Vergleich* der aus dem kinematischen Modell erhaltenen Werte mit den Herstellervorgaben zeigt Anpassungsbedarf der Parameter auf.

Die Parameter wurden so lange variiert, bis die Ergebnisse des kinematischen Modells den Vorgaben des Herstellers entsprach. Dieses entwickelte generische Fahrzeugkinematikmodell für Elektrofahrzeuge bietet eine Bewertungsgrundlage für betriebliche und technische Optimierungsmaßnahmen. Neben der Anwendung auf erhobene Messdaten, kann es auch in Verkehrssimulationswerkzeugen (wie zum Beispiel SUMO) verwendet wer-

den. Hierdurch können die Auswirkung von gezielten Einflussnahmen und Optimierungsmaßnahmen auf den vorherrschenden Verkehr und dessen weiteren Kenngrößen, wie zum Beispiel Beförderungs- und Wartezeiten, Verkehrsstärke oder Fahrzeug-Routing untersucht werden.

3 Instanziierung des generischen Modells auf Grundlage empirischer Daten

Im Rahmen eines vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) geförderten Forschungsvorhabens emil (Elektromobilität mittels induktiver Ladung) arbeitet die Braunschweiger Verkehrs-AG gemeinsam mit der Bombardier Transport GmbH, dem lokalen Energieversorger BS|ENERGY und der Technischen Universität Braunschweig daran, eine induktive Ladeinfrastruktur und eine kompatible Prototypen-Busflotte auf den Ringlinien M19 und M29 in Betrieb zu nehmen. Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) hat im Zuge des Aufbaus der Anwendungsplattform Intelligente Mobilität (AIM) vorhandene dieselangetriebene Fahrzeuge der Braunschweiger Verkehrs AG mit automatisierten Fahrgastzählanlagen und Schnittstellen zur Fahrzeugelektronik (IBIS-Wagenbus und CAN/FMS) ausgerüstet. Diese Daten können im Vorfeld der Planung der Ladeinfrastrukturen und der betrieblichen Planung des Einsatzprofils der Fahrzeuge ausgewertet werden, um zu einer optimalen Gesamtstrategie zu kommen. Bild 1 stellt in Form eines vermaschten Regelkreises die Abhängigkeiten des Batterieladezustands dar. Dabei wird die Wechselwirkung zwischen Ladeinfrastruktur- und Fahrzeugkomponentenauslegung deutlich. Der obere Bereich stellt das Fahrregime dar (z.B. Beeinflussung durch Vermeidung unnötiger Fahr- und Bremsspiele). Der untere Bereich ist die Ladestrategie (z.B. Anordnung zusätzlicher Ladeinfrastrukturen und/oder verlängerte Verweildauern auf Ladeinfrastrukturen). Beide Regelkreise wirken auf eine gemeinsame Regelstrecke (Ladezustand).

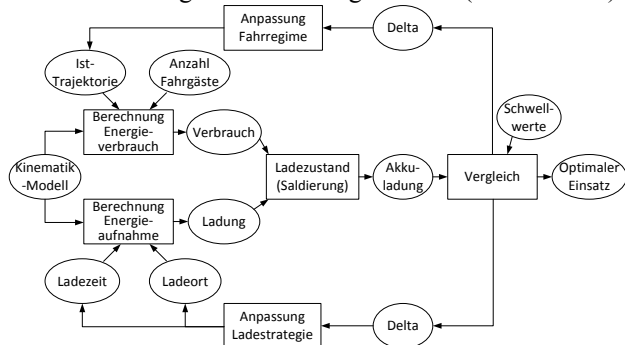


Bild 1 Mehrgrößenoptimierung elektr. Linienbetrieb

Im Folgenden wird Anhand empirisch gemessener Trajektorien der zu elektrifizierenden Buslinie M19 sowie tatsächlich beobachteter Fahrzeugbesetzungen der tatsächliche Energiebedarf für Fahrzeugumläufe entlang des Linienweges dargestellt. Bereits frühzeitig wurde festgestellt, dass der Besetzungsgrad der Fahrzeuge zu einer erheblichen

Schwankung des Fahrzeuggewichts führt. Insofern stand eine Fahrgastzählung zunächst im Vordergrund. Die Vorgehensweise der Betriebs- und Infrastrukturplanung ist hierbei wie folgt:

Schritt 1: Identifikation des bemessungsrelevanten Tageszeitbereichs. Für die Linie M19 wurde das Liniensegment Hauptbahnhof -> Madamenweg im Tageszeitbereich W4 (werktags, 18:00 Uhr bis Betriebsschluss) als der für eine Worst-Case-Abschätzung maßgebliche Bemessungsfall identifiziert. Für das zweite Liniensegment ist dies der Tageszeitbereich W1 (werktags, Betriebsbeginn bis 09:00 Uhr).

Schritt 2: Identifikation der minimalen, mittleren und maximalen Besetzung der Fahrzeuge über den Linienverlauf. Hierfür werden für die Worst-Case-Abschätzung die zuvor definierten kritischen Bereiche vertieft analysiert. Für die Bemessung wurden die drei maßgeblichen Fälle (Minimum, Mittel, Maximum) untersucht, um die Sensitivität der Batterieauslegung für den Parameter der Fahrzeugbesetzung zu untersuchen.

Schritt 3: Ermittlung der Haltestellenaufenthaltszeiten. Um die Ladeinfrastruktur an geeigneten Orten zu positionieren ist die Haltestellenaufenthaltszeit relevant. Zu diesem Zweck wurden die Haltestellenaufenthaltszeiten aus den Daten des Fahrgastzählsystems abgeleitet. Diese Werte wurden durch am gleichen Tag durchgeführte manuelle Erhebungen plausibilisiert. Beide Erhebungsverfahren wichen nur geringfügig voneinander ab.

4 Anwendung empirischer Daten im Modell

Resultierend aus den Messdaten zur Besetzung der Fahrzeuge im betrachteten Verkehrszeitraum W3, zeigt Tabelle 1 den errechneten (synthetischen) Energiebedarf eines Busses für einen Umlauf in Abhängigkeit der Besetzung und der Verlustzeiten. Für die Simulation wurde das Kinematikmodell entsprechend eines einzusetzenden Busses (Solaris Urbino 12 electric) vorgenommen.

	Energiebedarf für einen Umlauf der Buslinie M19 [kWh]	
	keine Verlustzeit (Priorisierung=)	Halt an allen 42 Lichtsignalanlagen
Maximale Besetzung	13,37	17,49
Mittlere Besetzung	11,81	15,29
Minimale Besetzung	10,07	13,80

Tabelle 1 Energiebedarf eines Umlaufs der Buslinie M19 in Abhängigkeit der Besetzung und Verlustzeiten an LSA

Entlang eines Umlaufs auf der Linie M19 befinden sich 27 Haltestellen und 42 Lichtsignalanlagen. Wie aus Simulationen auf Grundlage der synthetischer Fahrtverläufe hervorgeht, haben neben der Besetzung der Fahrzeuge (minimal, mittel, maximal) auch Verlustzeiten (z.B. durch Verzögerungen, Aufenthalte und Beschleunigungsvor-

gänge an Lichtsignalanlagen) einen maßgeblichen Einfluss auf den Energiebedarf der Fahrzeuge. Um eine ausreichende Zuverlässigkeit der Betriebsabwicklung zu ermöglichen, ist ein Ladesystem auf das Worst-Case-Szenario zu dimensionieren. Um jedoch den Grundsatz der Wirtschaftlichkeit nicht aus den Augen zu verlieren, können verkehrstechnische Maßnahmen einen Beitrag zur Reduktion dieser Verlustzeiten ermöglichen. Die zuvor dargestellten auf synthetischen Fahrtverläufen basierenden Energiebedarfe können mit Felddaten validiert werden.

Die erste für die Systemauslegung relevante Variable ist der *Energiebedarf*. Für jedes Streckensegment zwischen zwei Haltestellen wurden die Energiebedarfe für unterschiedliche Besetzungsgrade der Fahrzeuge ermittelt (Bus leer, minimale gemessene Besetzung, mittlere gemessene Besetzung, maximale gemessene Besetzung, Bus voll besetzt). Darüber hinaus wird der kumulierte Energiebedarf entlang des gesamten Linienverlaufs durch einen kontinuierlichen Funktionsverlauf für die zuvor genannten variierenden Besetzungsgrade ermittelt.

Die komplementäre für die Auslegung der Ladefrastruktur relevante Systemvariable ist die *mögliche Energieaufnahme* von Fahrzeugen im Linienverlauf (bspw. an Haltestellen). Haltestellen sind Zwangspunkte im Betriebsablauf kollektiver Verkehrssysteme. Sie eignen sich auf Grund der zu erwartenden höheren Aufenthaltsdauern der Fahrzeuge in besonderem Maße für die Anordnung von Elementen der Ladefrastruktur. Das Laderegime ist hier vorhersagbar und planbar. Hierfür wurden auf der Grundlage der aus Messwerten ermittelten Aufenthaltsdauern (gemessen in Sekunden) von im Betrieb befindlichen Fahrzeugen an den Haltestellen entlang des Linienweges die korrespondierende mögliche Energieaufnahme für jede Haltestelle entlang des Linienverlaufs abgeleitet.

Durch eine Überlagerung der beiden korrespondierenden Systemvariablen kann in einem nächsten Schritt der *Verlauf des Batterieladestands* abgeleitet werden und durch entsprechende Systemgestaltung (Infrastruktur- und Fahrzeugkomponenten) beeinflusst werden. Unter Berücksichtigung dieser Zusammenhänge, wird im weiteren Projektverlauf die Anzahl und Position erforderlicher Ladestellen bestimmt. Neben der Anordnung und Dimensionierung der Infrastruktur- und Fahrzeugkomponenten müssen dabei insbesondere die Lebensdauern der Li-Ionen-Batterie und die betriebliche Verfügbarkeit des elektrischen öffentlichen Personenverkehrs bei Störungen (z. B. Umleitung, Stau) entlang des Linienweges bei der Optimierung berücksichtigt werden.

5 Ausblick auf weitere Aktivitäten

Die ersten Ergebnisse des Projekts zeigen, dass für zukünftige Arbeiten eine differenziertere Betrachtung von Verlustzeitanteilen von ÖPNV-Fahrzeugen erforderlich ist. Aktuelle Ansätze des DLR im Zuge des Aufbaus einer ÖPNV-Fahrzeugplattform gehen in diese Richtung. Die zum aktuellen Zeitpunkt primär auf die Bewertung von Fahrgastwechseln und Haltestellenaufenthaltszeiten ausgerichtete Erhebung soll zukünftig um weitere Aspekte

ergänzt werden. Für die Analyse von Verlustzeitanteilen vor Lichtsignalanlagen ist hierbei eine Ergänzung der Fahrzeuge um Send- und Empfangseinrichtungen nach dem WLAN-Standard IEEE 802.11p für die Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation geplant. Diese Komponenten ermöglichen den Empfang von Informationen von Restrot- und Restgrünzeiten (SPAT-Telegramm) der 35 mit kooperativer Infrastruktur ausgerüsteter Kreuzungen entlang des Linienwegs der Buslinien M19/M29 in Braunschweig. Zusätzlich zu diesen Informationen stellt die Analyse von Fahrzeugtrajektorien mit den Daten des CAN-Fahrzeugbusses ein Potenzial dar, da hierdurch der Verkehr des Fahrzeugs im stockenden Verkehr ermittelt werden kann. Neben einer weiteren Ausarbeitung der empirischen Datenbasis durch das DLR ist seitens der TU Braunschweig eine Fortentwicklung der in diesem Beitrag dargestellten Basismodellierung in MATLAB vorgesehen. Ziel der Fortentwicklung ist eine verkehrslagesensitive Trajektorienplanung, beispielsweise unter Integration weiterer Simulationswerkzeuge wie SUMO. Hierbei kann auf die im Zuge der Anwendungsplattform Intelligente Mobilität (AIM) aufgebaute Verkehrsflusssimulation zurückgegriffen werden.

Das Projekt emil (Elektromobilität mittels induktiver Ladung - Betriebliche und infrastrukturelle Planung und Optimierung) wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert.

6 Literatur

- [1] Lampmann, V.; Wüst-Rocktäschel, C.: Premiere in Offenbach: 100-Prozent-Elektrobus im Test. In: Der Nahverkehr 09/2012, S. 47ff.
- [2] Müller-Hellmann, A.: Stadtbahnen und Elektromobilität – Ideen zu einer Symbiose. In: Der Nahverkehr 03/2012, S. 10ff.
- [3] Broussely, M.; et al: Main Aging Mechanisms in Li ion batteries. Journal of Power Sources, S. 90-96 (2005).
- [4] Meyna, Arno; Pauli, Bernhard: Zuverlässigkeitstechnik – Quantitative Bewertungsverfahren. Hanser (München) 2010.
- [5] Bosserhoff, Dietmar: Handbuch für Verkehrssicherheit und Verkehrstechnik: Kapitel 6.1. Hessisches Landesamt für Straßen- und Verkehrswesen (Wiesbaden) 2007.
- [6] Scholz, Gero: IT-Systeme für Verkehrsunternehmen – Informationstechnik für den öffentlichen Verkehr. Dpunkt.Verlag (Berlin) 2012.
- [7] Basile, Robert: Nebenverbraucher und ihr Einfluss auf Reichweiten von E-Bussen. In: der Nahverkehr, 11/2013, S. 20ff.
- [8] Kurczveil, Tamás; Schnieder, Eckehard: Implementation of an Energy Model and a Charging Infrastructure in SUMO. SUMO 2013 - Simulation of Urban MObility, Berlin, Deutschland, Mai 2013.