

25. Verkehrswissenschaftliche Tage 2016

- Minimale Belastung elektrischer Netze durch Ladevorgänge von Elektrobussen -

Dr.-Ing. Lars Schnieder¹, Dirk Weißer², Martin Schaefer³, Peter Maier⁴, Sebastian Naumann⁵, Hubert Büchter⁶, Jan Trumpold⁷, Tobias Frankiewicz¹

¹ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Verkehrssystemtechnik, Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig

² Init GmbH, Käppelestrasse 4-6, 76131 Karlsruhe

³ AVT Stoye GmbH, Longericher Straße 177, 50739 Köln

⁴ GEVAS software GmbH,
Nymphenburger Straße 14, 80335 München

⁵ ifak - Institut f. Automation und Kommunikation e.V. Magdeburg,
Werner-Heisenberg-Str. 1, 39106 Magdeburg

⁶ Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (IML),
Joseph-von-Fraunhofer-Str. 2-4, 44227 Dortmund

⁷ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Verkehrssystemtechnik,
Rutherfordstraße 2, 12489 Berlin

1 Einleitung

Im städtischen Verkehr ist die klassische als Umweltverbund bezeichnete Förderung umweltfreundlicher Verkehrsarten seit langem in der Verkehrsplanung etabliert. Durch die qualitätsgerechte Gestaltung der Angebotspalette öffentlicher Verkehrssysteme ist es der Bevölkerung hierbei möglich, auch ohne ein eigenes Automobil ihre Mobilitätsbedürfnisse weitestgehend flexibel zu befriedigen. Der ÖPNV kann durch den Einsatz alternativer Antriebskonzepte einen weiteren Beitrag zu einer verringerten Emission von Schall und Luftschadstoffen (PM10, CO₂ und NO_x) leisten. In diesem Zusammenhang stellt insbesondere die Ablösung

¹ Korrespondierender Autor: lars.schnieder@dlr.de, tobias.frankiewicz@dlr.de, www.dlr.de/ts

² dweisser@init-ka.de

³ Martin.schaefer@avt-stoye.de

⁴ Peter.maier@gevas.de

⁵ sebastian.naumann@ifak.de

⁶ Hubert.buechter@iml.fraunhofer.de

⁷ Jan.trumpold@dlr.de

von Diesel- durch Elektrobusse ein großes Potenzial dar [1]. Allerdings stellt dieser Paradigmenwechsel die ÖPNV-Unternehmen bereits in der Planung ihres Verkehrssystems vor neuartige Herausforderungen. Aktuell im ÖPNV eingesetzte Elektrobusse bewältigen ihre tägliche Fahrleistung nur mit Zwischenladevorgängen. Erfolgt das Zwischenladen auf eine örtlich und zeitlich ungünstige Weise, übersteigt der Leistungsbedarf die durch die Niederspannungsverteilstellen bereitgestellte Leistung. Das Projekt MENDEL (**M**inimale Belastung **e**lektrischer **N**etze **d**urch Ladevorgänge von **E**lektrobussen) verfolgt die nachfolgend aufgeführten Ziele:

- Minimierung der Investitionskosten für die Ladeinfrastruktur durch die optimale Ausnutzung vorhandener Niederspannungsverteilstellen zur Versorgung der Ladestellen. Dadurch wird weitgehend die Errichtung zusätzlicher Trafostationen zum Anschluss an das Mittelspannungsnetz vermieden.
- Minimierung der Betriebskosten für die Ladeinfrastruktur durch eine Minimierung des verbrauchsunabhängigen Leistungspreises sowie des Energieverbrauchs der Busse im operativen Betrieb.

Im Folgenden werden die zur Erreichung dieser Zielstellungen formulierten Automatisierungsaufgaben vorgestellt (vgl. Abschnitt 2). Anschließend wird die hieraus abgeleitete Systemarchitektur vorgestellt (vgl. Abschnitt 3) sowie das Konzept der praktischen Erprobung im Realbetrieb dargestellt (vgl. Abschnitt 4). Ein Ausblick auf den weiteren Verlauf des Projekts beschließt diesen Beitrag.

2 Hierarchische Struktur der Automatisierungsaufgaben

Die Mittel für die Zielerreichung sind Automatisierungsaufgaben. Diese Automatisierungsaufgaben können hierarchisch in einem Schichtenmodell dargestellt werden [2]. Jede Schicht beinhaltet hierbei mehrere zusammenwirkende oder zusammengefasste Teilfunktionen, die mit ihren über- oder untergeordneten Schichten im Sinne einer Vorgabe von Randbedingungen kooperieren. Die Automatisierungsaufgaben umfassen insbesondere:

- *Strategische Ebene:* Auf dieser Ebene findet eine Optimierung von Ladeinfrastruktur und Fahrzeugeinsatz statt. Bei der Planung der Fahrzeugumläufe und der Dienste werden die erforderlichen Ladevorgänge bereits derart berücksichtigt, dass der Leistungsbedarf durch die Ladevorgänge aller Busse zu jedem Zeitpunkt minimal ist.
- *Taktische Ebene:* Auf dieser Ebene wird das Lastmanagements im Betrieb optimiert. Intelligente Dienste regeln die Gesamtladeleistung im Mittelspannungsnetz unter Kenntnis (a) des aktuellen Betriebszustands, (b) aktueller Ladezustände der Busse, (c) prognostizierter Energiebedarfe und (d) des maximalen Leistungsangebots an den Ladestellen. Dies geschieht beispielsweise durch operative Fahrvorgaben (z. B. verlängerte Aufenthaltszeiten an Ladestellen).
- *Operative Ebene:* Auf dieser Ebene erfolgt eine energetische Optimierung der Fahrstrategie. Um insbesondere im Stadtverkehr häufige Halte gefolgt von energieintensiven Anfahrvorgängen an Lichtsignalanlagen zu vermeiden, wird eine kooperative Fahrerassistenzfunktion geschaffen. Diese Funktion verknüpft fahrzeug- und infrastrukturseitige Funktionen.

Die zuvor dargestellten abstrakten Automatisierungsaufgaben werden in Automatisierungsfunktionen umgesetzt. Im nächsten Abschnitt wird vorgestellt, wie diese Vorgaben eingehalten und umgesetzt werden.

3 Architekturmodell für die Konvergenz von Smart Grid und Intelligenten Verkehrssystemen (IVS)

Zur Realisierung der zuvor dargestellten Automatisierungsfunktionen stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung, die von ihren gerätetechnischen Trägern abhängen. Das im Projekt MENDEL entwickelte Systemkonzept zielt auf eine Konvergenz des intelligenten Stromnetzes (smart grid) und intelligenter Verkehrssysteme (intelligent transportation systems). Diese beiden Begriffe sind wie folgt definiert:

- *Intelligentes Stromnetz (smart grid)*: Dieser Begriff umfasst die kommunikative Vernetzung und Steuerung von Stromerzeugern, Speichern, elektrischen Verbrauchern und Netzbetriebsmitteln in Energieübertragungs- und -verteilungsnetzen der Elektrizitätsversorgung. Ziel ist die Sicherstellung der Energieversorgung auf Basis eines effizienten und zuverlässigen Systembetriebs (vgl. §1 des Energiewirtschaftsgesetzes, EnWG). Insbesondere die kommunikative Vernetzung von Netzbetriebsmitteln und Fahrzeugen als elektrische Verbraucher schlägt die Brücke zu den intelligenten Verkehrssystemen.
- *Intelligente Verkehrssysteme (intelligent transportation systems)* zielen darauf ab, innovative Dienste im Bereich verschiedener Verkehrsträger und des Verkehrsmanagements anzubieten, und die verschiedenen Nutzer mit umfassenderen Informationen zu versorgen und sie in die Lage zu versetzen, die Verkehrsnetze auf sicherere, koordiniertere und „klügere“ Weise zu nutzen (vgl. [3]). Der Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologie wird hierbei einen Beitrag zur Energieeffizienz leisten.

Das Projekt MENDEL ist durch einen integrativen Ansatz gekennzeichnet, der die zwei bislang separat betrachteten Domänen Intelligenter Verkehrssysteme (ITS) und Smart Grid zusammenfasst (vgl. Abbildung 1). Hierbei werden die aus einer ganzheitlichen Optimierung dieser bislang separat betrachteten Aspekte resultierenden Potenziale gehoben.

Das Projekt MENDEL wendet hierfür zum einen optimierte (Online-)Algorithmen für ein optimiertes Lastmanagement im Betrieb elektrisch angetriebener Busflotten an. Diese Algorithmen schließen die Erkennung von Nutzungskonflikten im Betrieb (z.B. die zeitliche Nutzung der Ladestellen) sowie adäquate Konfliktlösungsansätze mit ein.

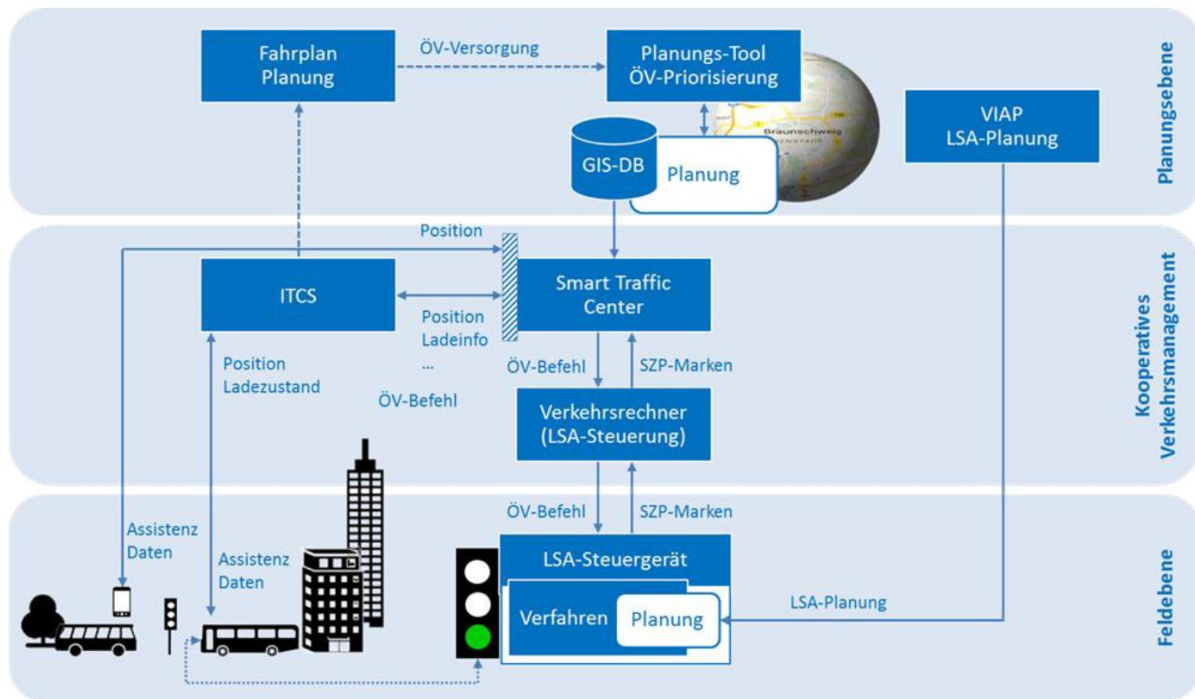


Abbildung 1: kooperativer Systemverbund aus ITS-Komponenten (Verkehrsrechner, Leittechnik des ÖPNV) und Smart Grid

Zum anderen entwirft das Projekt MENDEL ein Architekturkonzept eines kooperativen Systemverbundes zwischen Verkehrsrechner (Steuerung der Lichtsignalanlagen), dem Verkehrsmanagement sowie der Leittechnik des öffentlichen Personennahverkehrs (ITCS, Intermodal Transport Control System). Notwendige Erweiterungen in den Kommunikationsketten zwischen Fahrzeugen und Verkehrsinfrastruktur werden auf Basis herstellerunabhängiger Standards (OCIT und VDV) durchgeführt. Steuerungsverfahren und Kommunikationswegen im kooperativen Systemverbund werden unter Berücksichtigung einschlägiger Richtlinien für die Steuergeräte (VDE) und Verkehrsplanungen (RiLSA) erweitert. Darüber hinaus werden Dienste für das energieeffiziente Fahren elektrisch angetriebener Linienbusse prototypisch implementiert. Dies umfasst sowohl infrastrukturseitige Anteile (z.B. hybride Schaltzeitprognose) als auch fahrzeugseitige Anteile (z.B. Berechnung einer energieoptimalen Fahrzeugtrajektorie).

4 Erprobung im Realbetrieb

Feldtests nehmen in MENDEL eine zentrale Rolle ein. Auf diese Weise soll eine umfassende Bewertung der Effizienz, Qualität und Robustheit der im Projekt entwickelten IKT-Lösungen für das energieeffiziente Fahren elektrischer Linienbusse im ÖPNV erreicht werden. Die im Projekt MENDEL durchgeführten Feldtests stellen einen ersten Schritt für die Markteinführung ausgereifter Systemlösungen dar, welche ihre grundsätzliche Wirksamkeit zuvor bereits in Labor- und Simulationsstudien nachgewiesen haben. In der Stadt Braunschweig bereits vorhandene Test- und Forschungsinfrastruktur (vgl. Abschnitt 4.2) sowie die bereits im Betrieb erprobte elektrisch angetriebene Busflotte (vgl. Abschnitt 4.1) stellen für die Felderprobung ideale Voraussetzungen dar.

4.1 Integration der elektrisch angetriebenen Busflotte in das Projekt

Bei den von der Braunschweiger Verkehrs-GmbH eingesetzten elektrisch angetriebenen Bussen erfolgt die elektrische Energieübertragung mit dem von Bombardier entwickelten Ladesystem PRIMOVE. Im Rahmen des Projekts *emil* wurden 5 Ladestationen installiert, von denen bereits drei seit Ende 2013 im Einsatz sind. Zwei Ladestellen an der Endhaltestelle sichern die Erhaltungsladung. Zwei weitere Ladestationen werden für Zwischenladungen an längeren Haltestellenaufenthalten genutzt. Eine weitere Ladestation im Depot bereitet Fahrzeugbatterien nach jedem Betriebstag für den Dauereinsatz am folgenden Tag vor. Im Projektverlauf werden vier Busse (ein Solobus (vgl. Abbildung 2) sowie drei Einzelgelenkbusse) im Linienbetrieb erprobt. Der Solobus wird seit Anfang 2014 im Dauerbetrieb eingesetzt. Im Folgeprojekt *InduktivLaden* wurde eine vollständige Elektrifizierung der Buslinie M19 umgesetzt. Die induktive Energieübertragung des Ladesystems PRIMOVE kann ohne Behinderungen für Fahrgäste und ohne Aufwand für den Fahrer in den Linienbetrieb eingegliedert werden, da keine Ladekabel gehandhabt werden müssen. Die Energieübertragung wird durch die korrekte Positionierung der Fahrzeuge über Ladestationen automatisch initiiert. Die Energieübertragung mit einer Ladeleistung von über 200 kW bei Wirkungsgraden von über 90% entspricht mehr als dem Dreifachen der Ladeleistung, die bei Ladesystemen für Elektro-PKW in Serienlösungen maximal verfügbar ist (vgl. [4] und [5]).



Abbildung 2: Solaris Urbino 12m-Solobus mit Bomardier PRIMOVE-Ladetechnik

4.2 Integration des Projekts in die Anwendungsplattform Intelligente Mobilität

Mit der Anwendungsplattform Intelligente Mobilität (AIM) steht am Institut für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) ein umfassender Baukasten für die Entwicklung und prototypische Erprobung intelligenter Mobilitätsdienste zur Verfügung (vgl. [6] und [7]). Mit dem langfristigen Betrieb der Forschungsinfrastruktur bis über das Jahr 2028 geht das DLR weit über den Rahmen konventioneller Forschungsprojekte mit temporär betriebenen Anlagen hinaus. Die geschaffene Forschungsinfrastruktur steht für gemeinsame Projekte mit Partnern aus Industrie und Wissenschaft zur Verfügung. Die Wiederverwendung vorhandener Bausteine führt zu einer Kosten- und Zeitersparnis in der praktischen Demonstration wissenschaftlicher Erkenntnisse. Dieser Beitrag stellt die besonderen Herausforderungen eines dauerhaften Betriebes einer Forschungsinfrastruktur im öffentlichen Straßenraum dar. Die Referenzstrecke für die Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation besteht aus einem mehr als 12km langen Streckenzug mit insgesamt 35 für

den Betrieb kooperativer Fahrerassistenzsysteme ausgerüsteten Lichtsignalanlagen. Die einzelnen Kreuzungen sind für die Datenübertragung mit den W-LAN Standards IEEE 802.11p (Kommunikation mit Kraftfahrzeugen) und IEEE 802.11 b/g/n (Kommunikation mit nicht-motorisierten Verkehrsteilnehmern) ausgestattet (vgl. Abbildung 3)



Abbildung 3: Sende- und Empfangseinrichtungen für die Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation

5 Ausblick

Das Projekt MENDEL befindet sich aktuell in der Startphase. Basierend auf der aktuell laufenden Anforderungsanalyse liegt der Fokus in der ersten Projektphase auf der Definition zukünftiger herstellerunabhängiger Schnittstellenstandards. Die im Projekt geschaffenen Standards werden in die OCIT Development Group (Open Communication Interface for Road Traffic Control Systems), bzw. in laufende Standardisierungsaktivitäten des Verbandes Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) eingespeist. Die Ergebnisse werden im Rahmen einer Feldstudie in das städtische Verkehrsmanagement der Stadt Braunschweig integriert und evaluiert. Die Standardisierung zusammen mit der praktischen Erprobung stellt eine Übertragbarkeit der im Projekt MENDEL entwickelten Lösungsansätze auf andere Städte sicher.

6 Literatur

- [1] Müller-Hellmann, Adolf: *Batteriebusse ante portas!? Zeit ist reif für Start der Ablösung von Diesel- durch Elektrobusse*. In: Der Nahverkehr, Heft 5/2013, S. 21 ff.
- [2] Schnieder, Eckehard: *Methoden der Automatisierung – Beschreibungsmittel, Modellkonzepte und Werkzeuge für Automatisierungssysteme*. Vieweg (Braunschweig) 1999.
- [3] Europäische Union: *Richtlinie 2010/40/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 7. Juli 2010 zum Rahmen für die Einführung intelligenter Verkehrssysteme im Straßenverkehr und für deren Schnittstellen zu anderen Verkehrsträgern*. Amtsblatt der Europäischen Union L 207/1.
- [3] Meins, Jürgen; Graffam; Christopher: *Induktive Energieübertragung für Elektrobusse nutzen - Ein Mosaikstein in der Elektromobilität wird in Braunschweig erprobt*. In: Der Nahverkehr 9/2011, S. 18ff, Alba (Meerbusch) 2011.
- [4] Kurczveil, Tamas; Schnieder, Lars: *Simulationsbasierte Planungs-prozesse für die betriebliche Eingliederung induktiv geladener Busse in den Betrieb*. In: Der Nahverkehr 32 (2014) 12, Seiten 24 – 29.
- [5] Schnieder, Lars; Lemmer, Karsten: *Entwicklung intelligenter Mobilitätsdienste im realen Verkehrsumfeld in der Anwendungsplattform Intelligenter Mobilität*. Internationales Verkehrswesen 66 (2014) 2, S. 2-4.
- [6] Schnieder, Lars; Lemmer, Karsten: *Anwendungsplattform Intelligente Mobilität – eine Plattform für die verkehrswissenschaftliche Forschung und die Entwicklung intelligenter Mobilitätsdienste*. Internationales Verkehrswesen (64) 4/2012, S. 62-63.