

# Höhere Effizienz des Einsatzes von E-Bussen

Ergebnisse und Bewertung des Forschungsprojekts MENDEL zur minimalen Belastung elektrischer Netze durch das Laden von Batteriebusen

Sebastian Naumann, Christian Hübner, Magdeburg; Hubert Büchter, Dortmund; Manuel Quinting, Karlsruhe; Thilo Schön, München; Jan Trumpold, Daniel Wesemeyer, Berlin; Maik Bargmann, Braunschweig

In der Ausgabe 12/2019 von DER NAHVERKEHR haben die Autoren die strategische und taktische Ebene des Forschungsprojektes MENDEL für den optimierten Einsatz von E-Bussen erörtert. Im aktuellen Beitrag sollen nun, darauf aufbauend, die operative Ebene, Simulation, Feldtest und die abschließende Bewertung vorgestellt werden.

## Operative Ebene

### Lastmanagement

Das Lastmanagement ist auf der operativen Ebene angesiedelt und dient dazu, die Betriebskosten zu minimieren und auch im

Störungsfall einen zuverlässigen Betrieb von Elektrobussen zu gewährleisten. Dazu überwacht das Lastmanagement kontinuierlich den Ladezustand der Elektrobusse und die aktuell verfügbare Ladeleistung an den Ladepunkten entlang der Strecke. Wenn der Ladezustand im verbleibenden Umlauf einen definierten Grenzwert zu unterschreiten droht, greift das Lastmanagement ein und verlängert die Aufenthalte an den Ladestellen. Zur Vermeidung von Lastspitzen oder bei Engpässen im Stromnetz kann das Lastmanagement gezielt Ladeaufenthalte verkürzen oder komplett unterbinden. Dabei arbeitet das Lastmanagement eng mit der Leitstelle des Verkehrsunternehmens zusammen, um

Informationen über die aktuelle Verspätungslage der Busse zu erhalten und die Ladevorgaben an die Busse weiterzugeben.

Das Lastmanagement kann als Erweiterung eines bestehenden Intermodal-Transport-Control-Systems (ITCS) betrachtet werden, das die Position der Busse in Echtzeit mit geringer Latenzzeit verfolgt. Neben der aktuellen Position kennt das ITCS auch den Fahrplan und die Routen aller beteiligten Fahrzeuge und ist in der Lage, die Ankunftszeit an bestimmten Haltepunkten entlang der Strecke zu prognostizieren, um den Fahrgästen an den Haltepunkten die erwartete Ankunftszeit anzuzeigen. Es ist zu beachten, dass das Lastmanagement

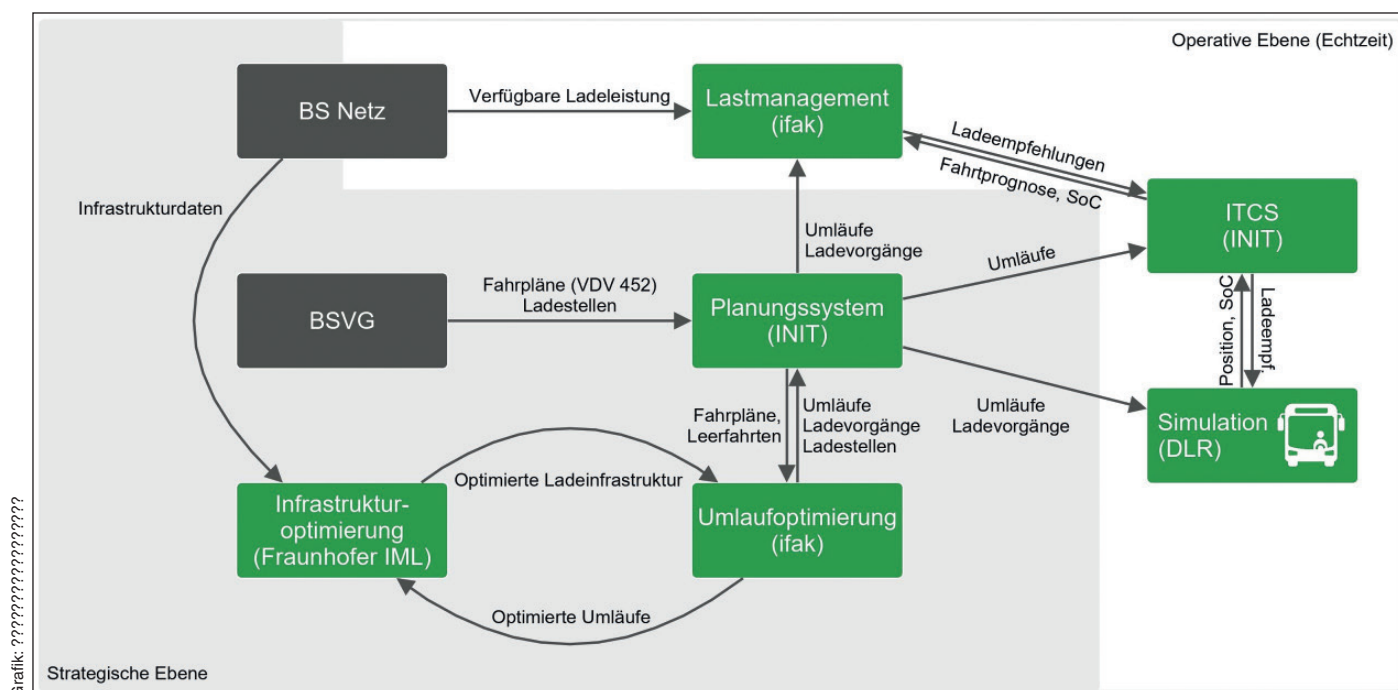
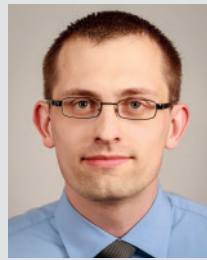


Abb. 1: Systemskizze.



## Zum Autor

**Sebastian Naumann (44)** ist seit 2002 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Automation und Kommunikation e.V. Magdeburg (ifak) im Geschäftsfeld Verkehr und Assistenz. Er beschäftigt sich seitdem in verschiedenen nationalen und internationalen Forschungsprojekten mit Lichtsignalanlagen, Fahrgastinformationssystemen und Elektrobussen. Naumann studierte von 1996 bis 2001 Informatik an der Technischen Universität Ilmenau.



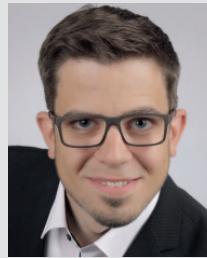
## Zum Autor

**Christian Hübner (37)** ist seit 2009 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Automation und Kommunikation e.V. Magdeburg (ifak) im Geschäftsfeld Wasser und Energie. Er beschäftigt sich seitdem in verschiedenen nationalen und internationalen Forschungsprojekten mit der Automatisierung von Energieverteilnetzen und Lastmanagement sowie mit der Entwicklung von Laufzeitsystemen zur Datenintegration und überlagerten Regelung im Bereich Abwasser und Energie



## Zum Autor

**Hubert Büchter (65)** war seit 1982 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik, Dortmund. Nach dem Studium der Elektrotechnik war er in der Qualitätssicherung und in der Funkgerätefertigung tätig. Seit vielen Jahren arbeitete er auf den Gebieten der Optimierung und der Steuerungsentwicklung in Bereich der Intralogistik. Seit 2019 befindet er sich im Ruhestand.



## Zum Autor

**Manuel Quinting (34)** ist seit 2018 Research & Development Manager bei INIT in Karlsruhe. Er leitet und koordiniert nationale sowie internationale Forschungsaktivitäten von INIT zur Digitalisierung im ÖV und hatte die MENDEL-Projektleitung inne. Zuvor war er mehrere Jahre lang als Leiter sowohl von Geschäftsentwicklungs- als auch Infrastrukturprojekten bei verschiedenen Verkehrsunternehmen tätig.



## Zum Autor

**Thilo Schön (49)** arbeitet seit 1996 als Systemanalytiker bei der Gevas Software GmbH in München. Er ist im Bereich Verkehrsmanagement in der Konzeption und Entwicklung in den Themengebieten Schaltzeitprognose, zentrale Anmeldung und Schnittstellen tätig, außerdem im Bereich Qualitätssicherung. Er studierte Informatik mit Diplomabschluss an der Technischen Universität München.



## Zum Autor

**Jan Trumpold (36)** ist seit 2014 wissenschaftlicher Mitarbeiter beim Institut für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) e.V. Er beschäftigt sich mit Forschung und Entwicklung im Bereich der Verkehrssteuerung und -koordination; speziell mit der Entwicklung neuer Steuerverfahren für Lichtsignalanlagen (LSA). Er ist für das LSA-Labor des DLR in Berlin verantwortlich. Trumpold studierte Verkehrssystemtechnik an der Westsächsischen Hochschule Zwickau.



## Zum Autor

**Daniel Wesemeyer (33)** ist seit 2017 wissenschaftlicher Mitarbeiter am DLR in Berlin. Er studierte bis 2015 Verkehrsplanung und Verkehrsbetrieb an der TU Berlin. Von 2015 bis 2017 untersuchte er das Verhalten von Reisenden in agentenbasierten Simulationen am Innovationszentrum für Mobilität und gesellschaftlichen Wandel (InnoZ) in Berlin. Seine aktuellen Forschungsgebiete sind u.a. adaptive, kooperative Signalsteuerung und Vehicle-to-Infrastructure (V2I)-Kommunikation.



## Zum Autor

**Maik Bargmann (27)** ist seit 2019 wissenschaftlicher Mitarbeiter beim Institut für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) e.V. in Braunschweig. Sein Masterstudium Elektrotechnik hat er 2018 an der TU Braunschweig abgeschlossen. Beim DLR beschäftigt er sich mit Vernetzungskonzepten für zukünftige Verkehrssysteme. Auf diesem Themengebiet ist er seit seiner Bachelorarbeit tätig.

den Betriebsablauf des Busverkehrs so wenig wie möglich stören sollte, um Verzögerungen für die Fahrgäste zu vermeiden.

Der Betrieb des Lastmanagements erfordert, dass neben der aktuellen Position auch der Ladezustand der Elektrobusse kontinuierlich an das ITCS übermittelt und von dort in Echtzeit an das Lastmanagement weitergegeben wird. Zusätzliche Informationen wie das aktuelle Passagieraufkommen oder die Kilometerzahl können ebenfalls erfasst werden, um den Energiebedarf besser abschätzen zu können.

Neben der Kommunikation zwischen Lastmanagement und ITCS für Verkehrsdaten muss eine Verbindung zu einem System bestehen, das die Informationen über die verfügbare Ladeleistung an einzelnen

Ladepunkten zu bestimmten Zeitpunkten liefert. Ein solches System wird nur benötigt, wenn Ladepunkte berücksichtigt werden müssen, die nicht immer die maximal verfügbare Stromversorgung garantieren können. Dieses System müsste von dem für die Stromnetzinfrastruktur verantwortlichen Verteilnetzbetreiber verwaltet werden. Zu diesem Zweck müssen die Ortsnetzstationen, welche die Busladepunkte speisen, mit Automatisierungstechnik einschließlich Leistungsmessung ausgestattet sein, um eine Zustandsabschätzung des jeweiligen Stromnetzes durchzuführen [1].

### Smart Traffic Center und hybride Schaltzeitprognose

Die zentrale ÖV-Anmeldung ohne lokale Meldepunkt-Versorgung ist das Kern-

stück des Smart-Traffic-Centers. Dazu kommt die hybride Schaltzeitprognose, die statistische Verfahren mit Echtzeitinformationen kombiniert. Aus der Lichtsignalanlage werden aktuelle Anforderungen des ÖV empfangen. So wird die Prognosequalität verbessert und gleichzeitig eine einfach zu pflegende, flexible und effiziente ÖV-Beschleunigung erreicht.

Bei der zentralen ÖV-Anmeldung erfolgt das Auslösen von An- und Abmeldungen nicht mehr lokal, sondern in einer zentralen Software auf Basis der vom Bus empfangenen Positionsmeldungen. Dazu wurde im Projekt eine Software für die zentrale Anmeldung von Gevas Software entwickelt und eingesetzt.

Bitte die Bilder 2 bis 8 neu liefern, da zu klein (Fotos: \*.jpg / 300 dpi Auflösung, in einer Breite von mindestens 12 cm, Grafiken können als \*.ppt bzw. \*.xls-Datei geliefert werden. Es gehen auch hochauflösende PDFs.

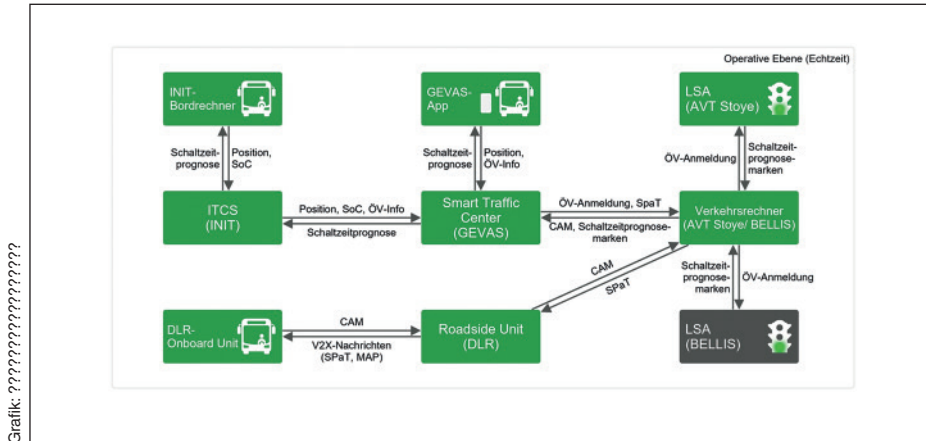


Abb. 2: BU fehlt

Für die Übertragung der Positionsmeldungen wurden drei Wege implementiert und erfolgreich getestet:

- Empfang der Positionsmeldungen über das mit dem Smart Traffic Center gekoppelte Mobile-ITCS von Init (ÖV-Betriebsleitsystem).
- Empfang über den Weg einer Onboard-Unit (OBU) des DLR im Bus, die mit einer IRS (Intelligent Roadside Stations, auch: RSU) am Knotenpunkt kommuniziert.
- Direkte Übermittlung der Positionen über eine Smartphone-App von Gevas Software per Mobilfunk. Dieser Weg benötigt praktisch keine Infrastruktur und eignet sich auch für Busse, die weder mit einer OBU ausgerüstet sind noch über ein ITCS geführt werden.

Die empfangenen Positionen werden fortlaufend – unter Zuhilfenahme einer importierten VDV-ÖV-Routenversorgung – auf der Karte verortet. Beim Überfahren bestimmter Punkte werden dann An- oder Abmeldungen ausgelöst (und an die lokale Steuerung übermittelt). Dafür gibt es wieder drei Möglichkeiten:

- Klassische Festlegung der Meldepunkte an bestimmten Orten beziehungsweise in bestimmten Entfernungen zur Haltlinie.
- Festlegung von Meldepunkten durch eine zeitliche Distanz zur Haltlinie: Die Zentrale bestimmt aus aktuellen und historischen Daten die voraussichtliche Restfahrzeit zur Haltlinie und löst den Meldepunkt passend aus.
- Kontinuierliche Anmeldung: Ab Überschreiten einer bestimmten Entfernungsschwelle wird das ankommende ÖV-Fahrzeug sekundlich mit der aktuell erwarteten Restfahrzeit, der angeforder-

ten Signalgruppe und Richtung und der in der Zentrale berechneten Priorisierung an die Lichtsignalanlage gemeldet. Die lokale Logik kann so flexibel und zeitnah auf verschiedene Fahrzeuge und Verkehrsbedingungen reagieren.

Allen Anmelde-Möglichkeiten gemein ist, dass die Meldeorte weder lokal in der Anlage noch in den ÖV-Fahrzeugen gepflegt werden müssen. In der lokalen Logik wird nur noch die Reaktion auf Anmeldungen für bestimmte Richtungen und die Handhabung unterschiedlicher Prioritäten implementiert.

In der Zentrale ist eine flexible Priorisierung nach verschiedenen Kriterien möglich. Die Priorität eines Fahrzeugs wird für jede Anmeldung nach hinterlegten Kriterien berechnet, die zum Beispiel Linie und Route, aktuelle Verspätung, Belegungsgrad, Ladezustand bei Elektrofahrzeugen und die Tageszeit enthalten können. Die Priorisierungsregeln können jederzeit in der Zentrale ohne Änderung der lokalen Steuerung angepasst werden.

### Fahrerassistenzsysteme

Energieintensive Anfahrvorgänge lassen sich ebenfalls mit Fahrerassistenzsystemen einsparen. Findet die ÖV-Priorisierung über das ITCS statt, ist es naheliegend, entsprechende Anzeigen in den Bordrechner zu integrieren. Dazu wurde für den Bordrechner von Init eine Softwareerweiterung implementiert, die zum einen das aktuelle Signalbild der nächsten LSA anzeigt und zum anderen dem Fahrer prognostiziert, wie lange die aktuelle Rotphase noch andauert und ob er bei seiner aktuellen Fahrweise die LSA bei Grün oder Rot erreicht.

Neben einer Bordrechner-Anzeige besteht die Möglichkeit, dem Fahrer über eine Smartphone-App zu assistieren. Wie bereits beschrieben können per Smartphone auch Fahrzeuge ohne OBU oder ITCS angemeldet werden. Zusätzlich ist so die Anzeige des aktuellen Anmeldestatus und einer Prognose über das Erreichen der nächsten Grünphase möglich. Von Gevas Software wurde dazu eine App entwickelt, die in verschiedenen Varianten eingesetzt werden kann, von der reinen Anmeldung bis hin zur grafischen Grüne-Welle-Darstellung. So können bei der ÖV-Priorisierung in einer Stadt auch einbrechende Regionalverkehre, die nicht an das ITCS angeschlossen sind, mit geringem Aufwand berücksichtigt werden.

### Schnittstellen

Um die Übertragbarkeit der in **Mendel** entwickelten Prototypen zu gewährleisten, sollte auf bestehende, bewährte Standardschnittstellen zurückgegriffen werden. Da gegenwärtig die gängigen Echtzeit-Schnittstellen im ÖPNV die speziellen Anforderungen von Elektrobussen noch nicht unterstützen, wurden bestehende Standards erweitert. So wurde für die Kommunikation zwischen Fahrzeug und ITCS der CEN-Standard SIRI VM um den Ladestand erweitert. Die Versorgung des Lastmanagements mit Fahrtprognosen des ITCS erfolgte über den Allgemeinen Nachrichtendienst (AND) der VDV-453. Ebenso wurde dieser Dienst für die Rückübermittlung der Ladeempfehlungen an das ITCS genutzt. Zum Import von Fahrplandaten und zum Export von Umlauf- und Ladeinfrastrukturdaten kam die Solldaten-Schnittstelle VDV 452 mit einigen Erweiterungen zum Einsatz.

Bei den Lichtsignalsteuergeräten sowie bei den zentralen Komponenten setzte **Mendel** bewusst auf den etablierten Industriestandard OCIT der ODG und ergänzte diesen an den notwendigen Stellen:

- OCIT-O (OCIT Outstations) als standardisierte Schnittstelle zwischen Verkehrsrechnerzentrale und Lichtsignalsteuergeräten,
- OCIT-C (OCIT-Center to Center) als standardisierte Schnittstelle zwischen zentralen Komponenten und Systemen.

Der konsequente Einsatz des OCIT-Standards gewährleistet eine einfache Übertragbarkeit auf viele andere kommunale Bestandssysteme. OCIT hat insbesondere in Deutschland eine sehr große Verbrei-



tung und ist der einzige offene Standard in diesem Segment.

In *Mendel* wurde mit zwei verschiedenen OCIT-Verkehrsrechnersystem gearbeitet. Im Testsystem Braunschweig wurde der bestehende Verkehrsrechner der Stadt in das Testfeld mit eingebunden. Die Anpassungen wurden so gering wie möglich gehalten. Damit ist das Testfeld Braunschweig eine sehr gute Referenz für viele andere Bestandssysteme.

Auf dem Gelände des DLR in Braunschweig wurde ein idealisiertes Testsystem aufgebaut. Dafür wurden ein eigener Testverkehrsrechner sowie eine Lichtsignalanlage installiert. Die Kommunikation zwischen Verkehrsrechner und der Lichtsignalanlage wurde unter dem Gesichtspunkt der Latenzzeiten optimiert, so wie es auch andere kooperative Anwendungen zukünftig erfordern. Zur zentralenbasierten ÖPNV-Beeinflussung der Lichtsignalanlage wurde auf Basis des OCIT-Standards eine projektspezifische Erweiterung entwickelt, die deutlich mehr Funktionalität bietet als die herkömmlichen R09.16-Funktelegramme nach VDV, die zudem auch nur lokal wirken. Nach Abschluss des Projektes *Mendel* wird versucht, diese projektspezifische Erweiterung über die ODG in den OCIT-Standard einfließen zu lassen.

**Simulation, Feldtest und Bewertung**

Im Rahmen des Projekts wurden vom DLR verschiedene Vorgehensweisen erarbeitet, um die mikroskopische Verkehrsflusssimulationssoftware SUMO (Simulation of Urban Mobility; [www.sumo.dlr.de](http://www.sumo.dlr.de)) als Testhilfsmittel von Einzelkomponenten des *Mendel*-Gesamtsystems zu nutzen. Unter anderem wurde im Rahmen der Erhebung und Auswertung von empirischen Verkehrsdaten mithilfe des Verkehrsnachfragemodells TAPAS ([www.dlr.de/vf/tapas](http://www.dlr.de/vf/tapas)) des DLR-Instituts für Verkehrsforschung eine aktuelle Verkehrsnachfrage für die Stadt Braunschweig erzeugt und in der SUMO-Simulation hinterlegt. Darüber hinaus stellten die Braunschweiger Verkehrsbetriebe ihre VDV 452 Betriebsdaten aus deren rechnergestütztem Betriebsleitsystem bereit. Diese Daten wurden in die Simulation importiert, um die betrieblichen Abläufe, Fahrpläne, Umläufe und Haltestellen möglichst realitätsnah abzubilden. Die Eigenschaften der eingesetzten Elektrobusse sowie der vorhandenen und geplanten Ladeinfrastruktur wurden ebenfalls in SUMO implementiert (vgl. Abb. 3). Hierfür war eine Erweiterung

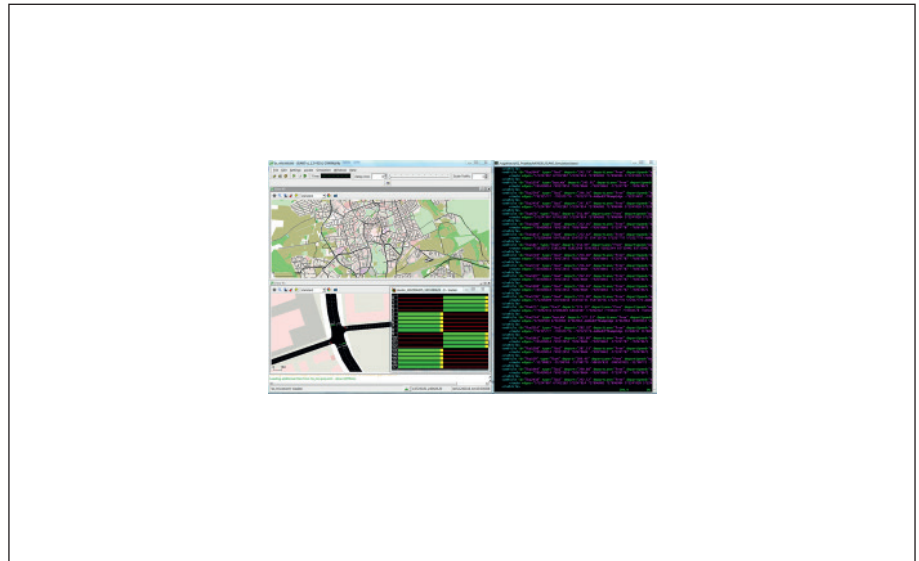


Abb. 3: SUMO-Simulation von Braunschweig mit Auswertung von Elektrobuskennwerten.

Grafik: ????????????????



Abb. 4: ÖPNV-Fahrtverlauf im Testfeld auf dem DLR-Gelände in Braunschweig.

Grafik: ????????????????

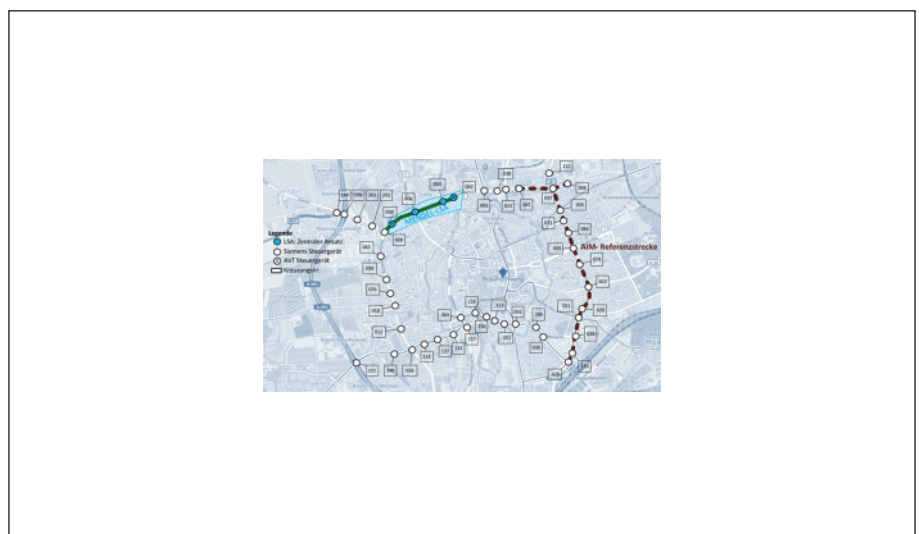
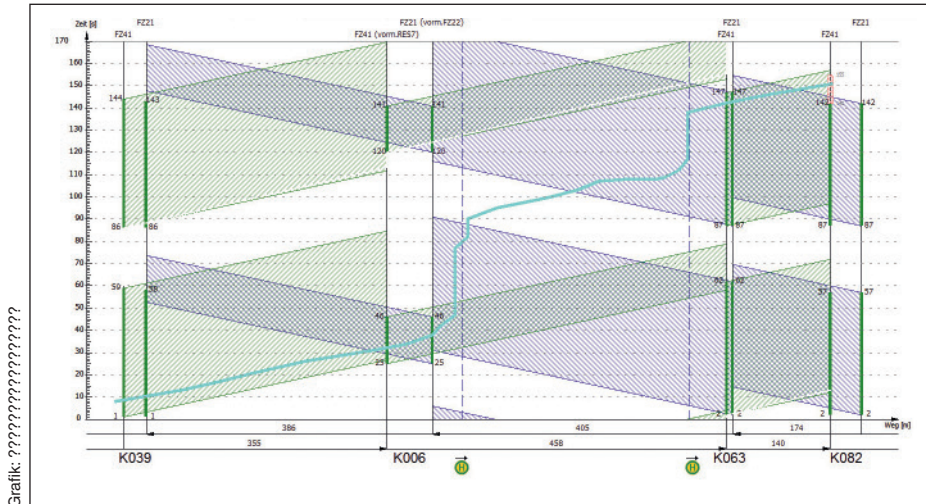


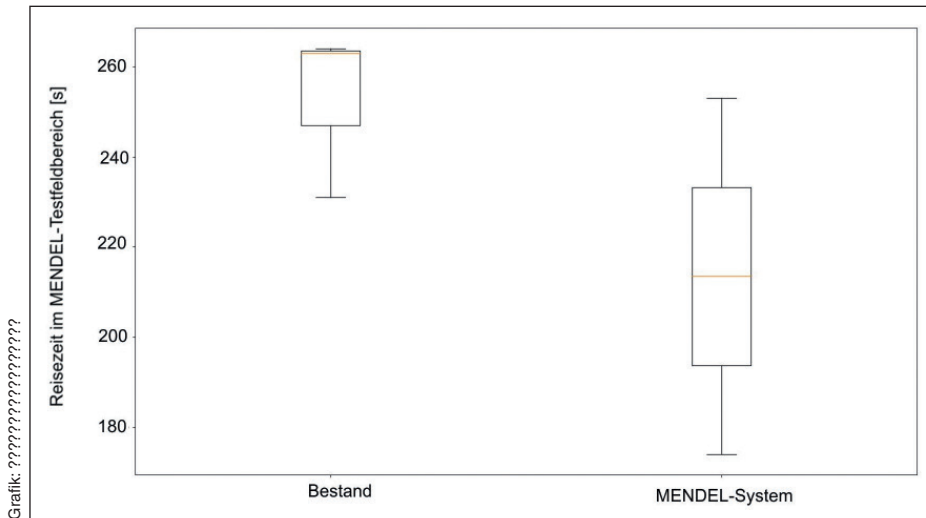
Abb. 5: *Mendel*-Testfeldbereich innerhalb der Großforschungsanlage AIM (Anwendungsplattform Intelligente Mobilität) in Braunschweig.

Grafik: ????????????????



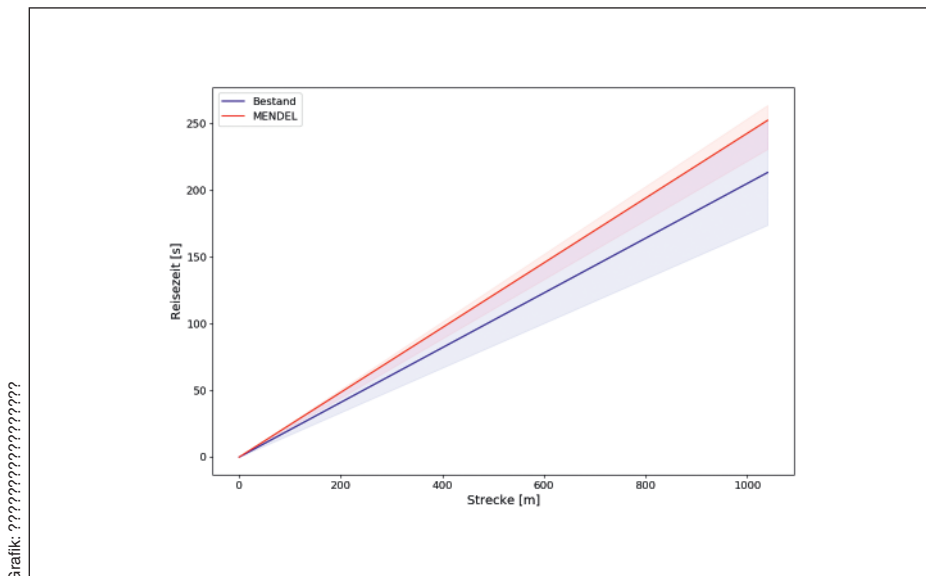
Grafik: ????????????????

Abb. 6: Zeit-Weg-Diagramm mit idealisiertem Fahrtverlauf und Freigabezeitenanpassung an LSA.



Grafik: ????????????????

Abb. 7: Boxplot (mit Median, Quartilen und Extremwerten) der Reisezeit der Elektrobusse im Feldtestbereich.



Grafik: ????????????????

Abb. 8: Zeit-Weg-Diagramm mit Geschwindigkeitsverlauf (Mittelwert und Streuung).

des „Electric Model“ (<http://sumo.dlr.de/wiki/Models/Electric>) in SUMO notwendig.

2018 wurden darüber hinaus sinnvolle Simulationstestszenarien mit den Projektpartnern abgestimmt, um mit deren Hilfe einzelne Komponenten des **Mendel**-Gesamtsystems in der Verkehrssimulation auf ihre Funktionsfähigkeit zu prüfen. Im Anschluss wurde das ITCS von Init über die TraCI-Schnittstelle (<https://sumo.dlr.de/docs/TraCI.html>) der SUMO-Simulation gekoppelt. So wurde erfolgreich die abschließende Prüfung des Init-ITCS mit Lastvorgangsempfehlungen aus dem Lastmanagementsystems des ifak mithilfe der SUMO Simulation durchgeführt.

Das Projekt umfasst strategische Aspekte im Sinne eines optimalen Fahrzeugeinsatzes in Verbindung mit einer optimalen Planung der Infrastruktur, taktische Aspekte im Sinne eines optimalen Lastmanagements im Betrieb und operative Aspekte im Sinne einer optimalen Fahrstrategie während der Betriebsdurchführung in Verkehrsunternehmen. Der Feldtest fokussierte das zuletzt genannte Teilziel. Dabei kamen ein Testfeld mit einer Lichtsignalanlage (LSA) auf dem DLR-Gelände in Braunschweig und ein Testfeld im Stadtgebiet von Braunschweig mit insgesamt vier Lichtsignalanlagen zum Einsatz. Im Stadtgebiet war es möglich, insgesamt zwei Wochen Realdaten für die Bewertung des Systems zu sammeln. Die Auswertung und Bewertung der Ergebnisse ist noch nicht vollständig abgeschlossen. Einige Teilergebnisse und deren Einordnung können hier jedoch bereits gezeigt werden.

Die Wirkungsweise der operativen Aspekte im Sinne einer optimalen Fahrstrategie sind im Idealisierter Fahrtverlauf des Zeit-Weg-Diagramms in Abbildung 6 dargestellt. In diesem Diagramm ist zudem der Signalisierungszustand sowie die ÖPNV-abhängige Freigabezeitenanpassung sichtbar. Weithin wird ersichtlich, dass energieintensive Abbrems- und Anfahrvorgänge an Lichtsignalanlagen für die Elektrobusse vermieden werden können. Lediglich an den Haltestellen werden diese in der Darstellung notwendig.

Die Ergebnisse der Auswertung zeigen für die betrachteten Elektrobusse geringere Reisezeiten als aktuell gefahren (vgl. Abb. 7). Eine höhere Varianz ist jedoch auch erkennbar. Damit macht sich die Bevorrechtigung der Busse an den Lichtsignalanlagen deutlich bei Reisezeit und Geschwindigkeit bemerkbar.

Im Zeit-Weg-Diagramm in Abbildung 8 sind die Geschwindigkeitsverläufe aller erfasster Busse mit aktiven *Mendel*-System und im Bestand dargestellt. Auch hier zeigen sich Verbesserungen bei der Geschwindigkeit. Die durchgehende Linie spiegelt den Mittelwert wider und die Fläche die zugehörige Streuung der Messwerte.

Auch wenn noch nicht alle Ergebnisse der Feldtests bis ins letzte Detail ausgewertet und bewertet wurden, so kann den-

noch bereits jetzt der positive Effekt auf die Reisezeit und den Energiebedarf der Elektrobusse durch operative Maßnahmen nachgewiesen werden. Sowohl *Mendel* als Gesamtsystem als auch die im Forschungsprojekt entwickelten Einzelkomponenten können die Effektivität beim Einsatz von Elektrobussen in Verkehrsunternehmen verbessern und somit die Elektrifizierung der ÖPNV-Flotten vorantreiben. Alle Folien und Poster der Abschlussveranstaltungen vom Juli 2019 einschließlich eines zusam-

menfassenden Videos sind auf der Projektwebsite <http://Mendel-projekt.de> verfügbar.

## Literatur / Anmerkungen

- [1] C. Hübner, A. Fedorov, C. Huth und C. Diedrich, *Extensible distribution grid automation using IEC 61131 in simulation and operation*, ETG Congress 2015 – Die Energiewende, 17.–18.11.2015, VDE Verlag (2015).
- [2] Ford, L. R.; Fulkerson, D. R.: A Suggested Computation for Maximal Multi-Commodity Network Flows. *Management Science* 5(1):97–101, 1958

## Zusammenfassung/Summary

**BT\_08\_Summary\_Head**

BT\_08\_Summary\_Text

**BT\_08\_Summary\_Head**

BT\_08\_Summary\_Text