

BETRIEB & INFRASTRUKTUR

Optimierter Einsatz von E-Bussen

Ergebnisse eines Forschungsprojekts zur minimalen Belastung elektrischer Netze durch das Laden von Batteriebussen

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

Im ÖPNV werden aus heutiger Sicht zukünftig vor allem batterieelektrische Busse zum Einsatz kommen und Schritt für Schritt die bestehenden Dieselbusse ablösen. Werden batterieelektrische Busse bisher in verschiedenen Kommunen im Pilotbetrieb auf einzelnen, besonders geeigneten Linien erprobt [1], so nahm das Projekt MENDEL (gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Rahmen des Technologiewettbewerbs „IKT für Elektromobilität III“ unter dem Förderkennzeichen 01ME15007, Laufzeit: 1.1.2016 bis 30.06.2019) die gesamte Flotte in den Blick und betrachtete ein System, das ausschließlich mit batterieelektrischen Bussen betrieben wird. Hierzu zählt insbesondere auch der Linienwechsel während eines Umlaufs, der bei Diesel- und Gasbussen normal ist [2].

Trotz aller Fortschritte in der Batterietechnik bewältigen Elektrobusse eine tägliche Fahrleistung von 250 km und mehr wegen der begrenzten Batteriekapazitäten nach wie vor nur mit Zwischenladevorgängen.

Dementsprechend werden an geeigneten Stellen im Liniennetz Ladestellen benötigt. Für die Bereitstellung der erforderlichen Ladeleistung muss das ÖPNV-Unternehmen eine jährliche Gebühr an den Stromnetzbetreiber entrichten (der Leistungspreis), deren Höhe sich an der Viertelstunde im Jahr mit der höchsten Leistung bemisst. Vor diesem Hintergrund sollten hohe Ladeleistungen durch viele gleichzeitig stattfindende Ladevorgänge möglichst vermieden werden. Insgesamt wurden Maßnahmen auf mehreren Ebenen ergriffen und entsprechende Algorithmen und Systeme entwickelt:

- **Strategische Ebene:** Auf dieser Ebene findet eine Optimierung der Ladeinfrastruktur statt. Verglichen mit [3] richtet sich die räumliche Anordnung der Ladeinfrastruktur nun nicht mehr nur nach den Umlaufplänen, sondern auch nach der Lage der vorhandenen Mittel- und Niederspannungsnetze.
- **Taktische Ebene:** Auf dieser Ebene findet eine Optimierung des Fahrzeugein-

satzes statt. Bei der Planung der Fahrzeugumläufe werden die erforderlichen Ladevorgänge bereits derart berücksichtigt, dass der Leistungsbedarf durch die Ladevorgänge aller Busse zu jedem Zeitpunkt möglichst gering ist.

- **Operative Ebene:** Ein Lastmanagement regelt die Gesamtladeleistung unter Kenntnis der aktuellen Ladezustände der Fahrzeuge und der prognostizierten Energiebedarfe. Zur Vermeidung häufiger Halte gefolgt von energieintensiven Anfahrvorgängen an Lichtsignalanlagen findet eine kooperative Steuerung zwischen den Fahrzeugen und den Lichtsignalanlagen statt.

Die Bestandteile wurden im Umfeld der Braunschweiger Verkehrs-GmbH entwickelt und dort erprobt. Auch wenn sich alle Entwicklungen bereits mit einer vollständig auf Elektrobusse umgestellten Flotte beschäftigten, lassen sich die Ergebnisse jedoch ohne weiteres auch schon auf einen Teil der Fahrten anwenden.

Strategische Ebene

Planung der Ladeinfrastruktur

Eine zweckmäßige und kostengünstige Ladeinfrastruktur hängt einerseits von statischen Parametern wie der Lage der Haltepunkte und der Stromversorgung ab, andererseits von dynamischen Parametern wie den Umläufen.

Haltepunktspezifische Kosten für die Errichtung von Ladestellen

Ladestellen müssen stets über eine Transformatorstation (von Mittelspannung auf Niederspannung) an das Stromnetz angeschlossen werden. Daraus ergibt sich die

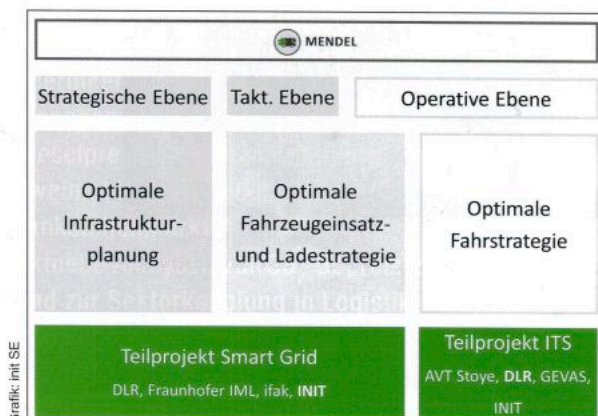


Abb. 1: Struktur des Projektes MENDEL.

Grafik: init SE



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 Steuerungsverfahren 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.

Möglichkeit, neue Transformatorstationen zu errichten oder bestehende zu nutzen, sofern hier noch Kapazitäten vorhanden sind. In beiden Fällen sind kostenintensive Tiefbauarbeiten zur Verlegung des Kabels zwischen Ladestelle und Transformatorstation erforderlich. Das Kabel wird dabei in der Regel parallel zur bestehenden Straße verlegt.

Im Projekt MENDEL wurde ein Verfahren entwickelt, welches die Kosten für Tiefbauarbeiten und Kabelverlegung unter Berücksichtigung der Positionen der Haltepunkte, der Lage der Transformatorstationen und der Lage von Stromverteilnetz und Straßennetz sowie oberflächenspezifischer Kostenfaktoren automatisiert berechnet. Dabei werden der Anschluss an die nächstgelegene Transformatorstation und der Anschluss an eine neu zu errichtende Transformatorstation am

nächstgelegenen Anschlusspunkt zum Mittelspannungsverteilnetz alternativ betrachtet. Die so ermittelten Kosten für beide Varianten unterstützen die Entscheidung zum Bau einer Ladestelle an einem bestimmten Haltepunkt. Jedoch können die Kosten derzeit allenfalls einen Anhaltspunkt geben, da freie Kapazitäten in den bestehenden Transformatorstationen nicht vorher geprüft wurden und auch Fragen der Grundstückseigentümerschaft sowie bestehende Bebauungen entlang des Mittelspannungsverteilnetzes bisher nicht berücksichtigt wurden.

Verfahren zur kostenminimalen Berechnung der erforderlichen Ladeinfrastruktur

Grundsätzlich geht es darum, aus einer Grundmenge (die Haltepunkte) eine Teilmenge (die Ladestellen) so auszuwählen,

dass die Kosten für die Errichtung der Ladestellen minimal ausfallen und dennoch die Durchführbarkeit der Umläufe sichergestellt wird. Die zuvor ermittelten haltepunktabhängigen Kosten für die Ladestellen bilden zusammen mit den Umläufen und den Batteriekapazitäten die wesentlichen Eingangsdaten. Bei den Umläufen sind neben dem Energiebedarf insbesondere die Haltedauern und Wartezeiten von besonderem Interesse.

Das entwickelte Optimierungsverfahren basiert auf einem Branch-and-Bound-Ansatz [4]. Die möglichen Lösungen werden während der Optimierung in einer Baumstruktur (Branch) verwaltet, von der bestimmte Zweige in der weiteren Berechnung nicht mehr betrachtet werden (Bound), um so den Rechenaufwand zu reduzieren.

BETRIEB & INFRASTRUKTUR

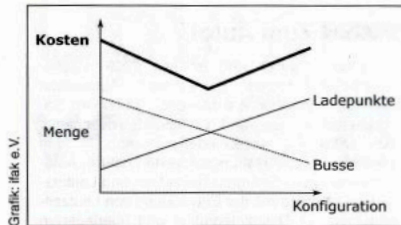


Abb. 2: Qualitative Darstellung des Verhältnisses zwischen Ladestellen, Bussen und den Kosten.

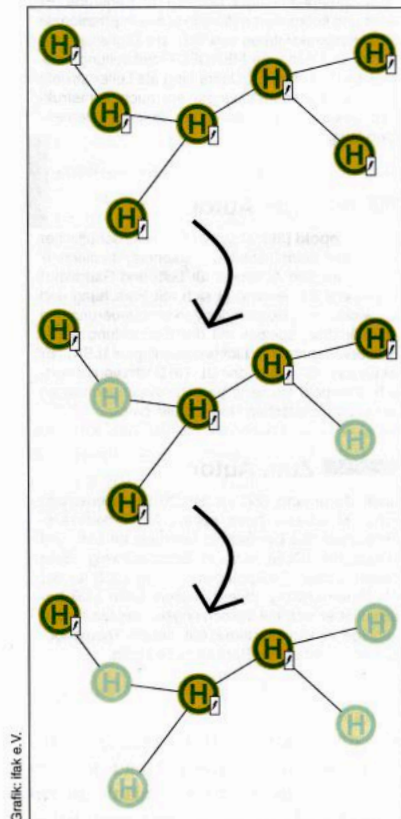


Abb. 3: Sukzessive Reduzierung der Ladestellen bei der Berechnung der kostengünstigsten Ladeinfrastruktur.

Zur Bewertung von Lösungen wird eine Simulation genutzt. Zu Beginn werden alle Fahrzeuge an ihrem ersten Halt platziert und die Batterieenergie auf den Anfangswert gesetzt. Der Simulator arbeitet ereignisgesteuert. Es gibt zwei Arten von Ereignissen: Abfahrt von einem Haltepunkt und Ankunft an einem Haltepunkt, wobei ein Haltepunkt in diesem Fall auch eine Ladestelle sein kann. Wenn ein Ereignis eintritt, werden die Ladezustände der Batterien aktualisiert und einige Daten für eine spätere

Auswertung gesammelt. Wenn die Energie mindestens eines Fahrzeugs unter ein definiertes Minimum fällt, stoppt die Simulation und gibt eine Maßzahl für den Fortschritt (Feasibility) zurück.

Wie sich die Lösungsmenge während des Aufteilungsschritts entwickelt, hängt von der Zugriffsstrategie der Warteschlange ab. Der Optimierer verwendet eine Kombination aus drei verschiedenen Grundstrategien: First in first out, last in first out sowie first in best out. Er beginnt mit einer Breitensuche und stellt die Ergebnisse in eine Prioritätswarteschlange mit begrenzter Kapazität k . Dies reduziert den Suchraum erheblich, birgt aber das Risiko, die Lösung für das globale Optimum zu verlieren. Die Priorität wird berechnet als das Verhältnis zwischen der Feasibility und den Kosten der aktuell ausgewählten Teilmenge. Dies ist ein Maß für das Nutzen-Kosten-Verhältnis, das letztlich die Selektionsstrategie darstellt.

Wechselseitige Abhängigkeit zwischen Umlaufplanung und Infrastrukturplanung

Das Verfahren zur Bestimmung der Ladeinfrastruktur versucht immer, eine kostenminimale Lösung für einen konkreten Umlaufplan zu finden. Jedoch ist ein Umlaufplan wiederum stark von der zur Verfügung stehenden Ladeinfrastruktur abhängig. Letztlich kann festgestellt werden, dass eine geringere Zahl an Fahrzeugen eine höhere Anzahl an Ladestellen bedeutet und umgekehrt. Dieser Zusammenhang ist qualitativ in Abbildung 2 dargestellt.

Um nun ein Kostenminimum für das Gesamtsystem zu finden, werden zunächst alle Haltepunkte mit einer Ladestelle ausgestattet und ein Umlaufplan berechnet. Für jede Ladestelle wird deren Kosten-Nutzen-Verhältnis ermittelt. Der Nutzen entspricht dabei der abgegebenen Energiemenge. Ladestellen mit einem Kosten-Nutzen-Verhältnis unterhalb einer bestimmten Schwelle werden entfernt. Es wird ein neuer Umlaufplan berechnet. Die Ladeinfrastrukturplanung überprüft, ob es für den Umlaufplan eine günstigere Ladeinfrastruktur gibt. Wenn ja, wird mit dieser weitergearbeitet. Das Verfahren wird solange wiederholt, bis die Gesamtkosten ein Minimum erreichen.

Problematisch ist bei diesem Vorgehen, dass die Planung ausschließlich auf dem aktuellen Fahrplan basiert. Man geht hierbei davon aus, dass dieser vor allem in Bezug auf die Linienführung und die Lage von

zentralen Umsteigepunkten einer gewissen Konstanz unterliegt.

Taktische Ebene

Planung der Fahrzeugumläufe

Bei Elektrobussen muss im Gegensatz zu Diesel- und Gasbussen bei der Umlaufplanung Rücksicht auf die beschränkte Reichweite genommen werden. Diese kann gesteigert werden, indem die Batterie zwischen den Fahrten oder auch während des Fahrgastwechsels nachgeladen wird. Das grundsätzliche Problem, die Fahrten so miteinander zu verketten, dass nur eine minimale Anzahl an Fahrzeugen benötigt wird und die Ausfallzeit der Fahrzeuge möglichst gering ist, bleibt jedoch unverändert.

Grundlage für die Lösung des Problems ist zunächst ein gerichteter Graph, der die Fahrten und die Ladestellen als eigene Knoten abbildet. Die Energiebedarfe für die Fahrten und Leerfahrten sind in den Fahrtnoten als Attribute hinterlegt, ebenso wie die in den Ladeknoten maximal in der jeweils zur Verfügung stehenden Zeit nachladbare Energiemenge.

Wenn zwei Fahrten grundsätzlich nacheinander ausgeführt werden können, werden die entsprechenden Fahrtnoten miteinander verbunden. Ist es zwischen zwei Fahrten auch noch möglich, die Batterie nachzuladen, wird entsprechend ein Ladeknoten eingefügt. Ein Umlauf entspricht dann einem Pfad vom Startdepot S zum Zieldepot T . Dabei ist es notwendig, die Änderung des Batterieladezustands während des Umlaufs mit zu berechnen und davon auch die Wegwahl an Verzweigungsstellen abhängig zu machen.

Auf Basis dieses Graphen wurden zwei Verfahren zur Umlaufplanung entwickelt. Das erste Verfahren basiert auf der Column-Generation-Methode, bei der das eigentliche Minimierungsproblem in ein duales Maximierungsproblem umgeformt wird. Für dieses Dualproblem werden neue Variablen (Columns) durch die wiederholte Suche nach dem jeweils kürzesten Pfad im Graphen nach Anpassung der Kantengewichte durch neuerliche Lösung des Dualproblems generiert. Am Ende wird das eigentliche Minimierungsproblem durch Auswahl der besten Columns gelöst [5].

Bei dem zweiten Verfahren handelt es sich um einen genetischen Algorithmus. Aus einer Menge von zunächst zufällig be-

BETRIEB & INFRASTRUKTUR

stimmten Lösungen (hier Umlaufplänen) (Population) findet durch Vererbung eine evolutionäre Verbesserung der jeweils folgenden Generation von Umlaufplänen statt. Dazu werden die Eigenschaften der Kandidaten, die im Sinne der Maximierungsziele die besten Werte erreichen, an die nächste Generation weitergegeben und zufällige Mutationen einbezogen. Der Algorithmus beendet seine Suche nach dem Erreichen eines definierten Kriteriums. In Abbildung 5 ist ein Ausschnitt eines auf diese Weise ermittelten Umlaufplanes zu sehen.

Verbesserung des Ladeplans

Im Zuge der Umlaufplanung wird gleichzeitig auch ein Plan zum Nachladen der Fahrzeugbatterien während der Umläufe generiert. Insbesondere bei höheren Ladeleistungen – im Projekt MENDEL wurde mit 200 kW gearbeitet – ist der für das Laden zur Verfügung stehende Zeitrahmen häufig länger als der Ladevorgang selbst. Unter diesen Umständen ist es für einen möglichst geringen Leistungspreis sinnvoll, die einzelnen Ladevorgänge so aufeinander abzustimmen, dass die Gesamtladeleistung jeweils minimal und die zeitlichen Abstände zwischen den Ladevorgängen im Sinne einer Robustheit gegenüber Verspätungen maximal ausfällt. Dies kann durch Verschieben der Ladevorgänge in ihren jeweiligen Zeitrahmen erreicht werden. Im Projekt wurde durch die wiederholte Optimierung zufällig ausgewählter zeitlich kürzerer Abschnitte der Gesamtladeplan entsprechend verbessert. Ein beispielhaftes Ergebnis ist in Abbildung 6 dargestellt.

Die operative Ebene sowie Simulation, Feldtest und abschließende Bewertung werden die Autoren in einem Folgebeitrag in dieser Zeitschrift behandeln.

Abb. 4: Graph mit Fahrtnoten und Ladeknoten für die Berechnung der Umläufe.

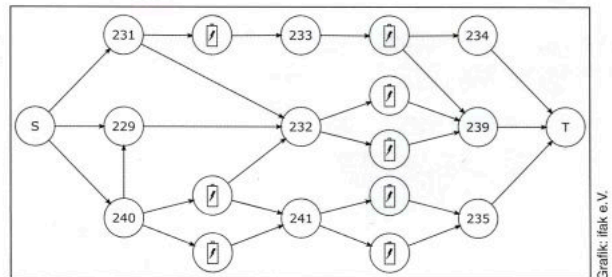


Abb. 5: Ausschnitt eines Umlaufplans mit Ladevorgängen.

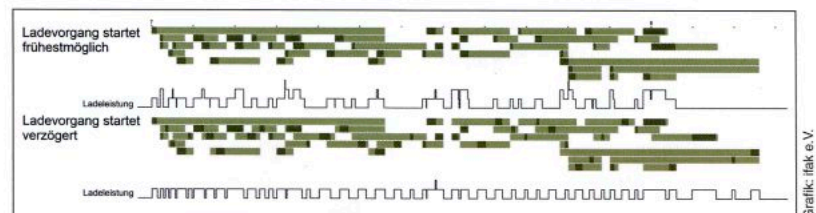
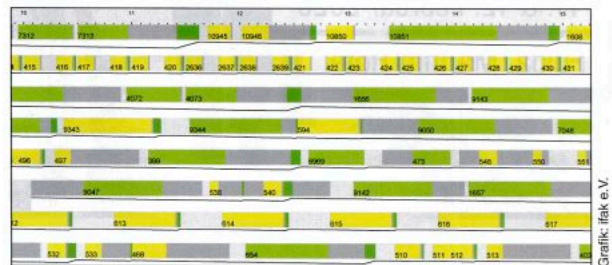


Abb. 6: Verbesserung des Ladeplans durch zeitliche Verschiebung der Ladevorgänge.

Literatur/Anmerkungen

- [1] Kurzweil, Tamas; Schnieder, Lars: Simulationsbasierte Planungsprozesse für die betriebliche Eingliederung induktiv geladener Busse in den Betrieb. In: DER NAHVERKEHR 32 (2014) 12, S. 24–29.
- [2] Schnieder, Lars; Weißer, Dirk; Schaefer, Martin; Maier, Peter; Naumann, Sebastian; Hübner, Christian; Trumpold, Jan; Frankiewicz, Tobias: Minimale Belastung elektrischer Netze durch das Laden von E-Bussen. DER NAHVERKEHR, 4/2016, S. 6–10
- [3] Büchler, Hubert; Naumann, Sebastian: Einsatz von E-Bussen präzise planen – Hybrides Planungswerkzeug für die Infrastruktur elektrisch betriebener Busse im öffentlichen Nahverkehr, DER NAHVERKEHR, 5/2015, S. 17–21
- [4] Land, A. H.; Doig, A. G.: An automatic method of solving discrete programming problems. In: Econometrica, Jg. 28 (1960), Nr. 3, 497–520, doi:10.2307/1910129.
- [5] van Kooten Niekerk, M. E.; van den Akker, J. M.; Hoogeveen, J. A. (2017). Scheduling electric vehicles. Public Transport, 9(1-2), 155–176.

Zusammenfassung/Summary

Optimierter Einsatz von E-Bussen

Trotz aller Fortschritte in der Batterietechnik können Elektrobusse aufgrund begrenzter Batteriekapazitäten nach wie vor nur mit Zwischenladevorgängen tägliche Fahrleistungen von 250 km und mehr bewältigen. Im Forschungsprojekt MENDEL wurden auf mehreren Ebenen Module für den möglichst kostengünstigen Einsatz von Elektrobussen im ÖPNV entwickelt. Auf der strategischen Ebene findet eine optimale Verteilung und Dimensionierung der Ladeinfrastruktur statt. Auf der taktischen Ebene erfolgt eine Optimierung des Fahrzeugeinsatzes. Auf der operativen Ebene regelt ein Lastmanagement die Gesamtladeleistung unter Kenntnis der aktuellen Ladezustände der Fahrzeuge und der prognostizierten Energiebedarfe. Zur Vermeidung häufiger Halte gefolgt von energieintensiven Anfahrvorgängen an Lichtsignalanlagen findet eine kooperative Steuerung zwischen den Fahrzeugen und den Lichtsignalanlagen statt. Der vorliegende erste Teil des Beitrags behandelt die strategische und die taktische Ebene.

Optimized use of electric buses

Despite all progress in battery technology, electric busses can still cover daily mileages of 250 km and more only with intermediate charging due to limited battery capacity. In the MENDEL research project, modules for the most cost-effective use of electric busses in public transport were developed on several levels. At the strategic level, optimal distribution and dimensioning of the charging infrastructure takes place. At the tactical level, the vehicle schedule is optimized. At the operational level, a charging management regulates the overall load performance, knowing the current state of charge of the busses and the forecast energy demands. In order to avoid frequent stops followed by energy-intensive accelerating at traffic lights, cooperative control between the busses and the traffic lights takes place. This first part of this article deals with the strategic and the tactical level.