

Optimierter Einsatz von E-Bussen

Ergebnisse eines Forschungsprojekts 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

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 hin zu einem 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 Niederspannungsverteilstetze.
- **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 ergeben sich

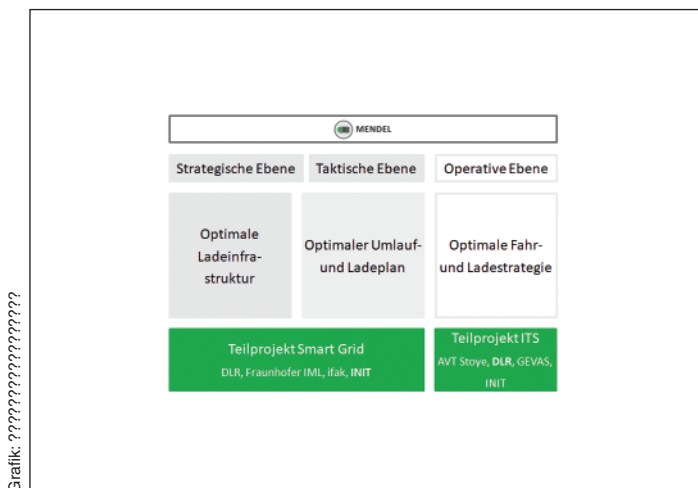


Abb. 1: Struktur des Projektes Mendel.

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

die Möglichkeiten, eine Ladestelle an eine bestehende Transformatorstation anzuschließen – sofern hier noch Kapazitäten vorhanden sind –, oder eine neue Transformatorstation zu errichten. In beiden Fällen sind kostenintensive Tiefbauarbeiten zur Verlegung des Kabels zwischen Ladestelle und Transformatorstation erforderlich. Die Kabel werden dabei in der Regel parallel zu bestehenden Straßen verlegt.

Im Projekt *Mendel* wurde ein Verfahren entwickelt, welches auf Basis der Positionen der Haltepunkte, der Lage der Transformatorstationen und der Stromverteilnetze sowie des Straßennetzes und oberflächenspezifischer Kostenfaktoren automatisiert die Länge für die Tiefbauarbeiten und Kabelverlegung berechnet und zwar einerseits für den Anschluss an die nächstgelegene Transformatorstation und andererseits für den Anschluss an eine neu zu errichtende Transformatorstation am nächstgelegenen Anschlusspunkt zum Mittelspannungsverteilnetz. 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 Bepflanzungen entlang des Mittelspannungsverteilnetzes bisher nicht berücksichtigt wurden.

Verfahren zur kostenminimalen Berechnung der erforderlichen Ladeinfrastruktur

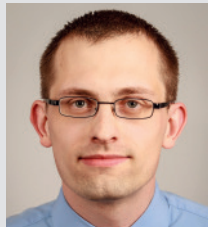
Grundsätzlich geht es darum, aus einer Grundmenge (die Haltepunkte) eine Teilmenge (die Ladestellen) auszuwählen, so dass die Kosten für die Errichtung der Ladestellen minimal ausfallen bei gleichzeitiger Durchführbarkeit der Umläufe. Die zuvor ermittelten haltepunktabhängigen Kosten für die Ladestellen bilden zusammen mit den Umläufen und den Batteriekapazitäten die wesentlichen Eingangsdaten. Bei den Umläufen sind neben dem Energiebedarf insbesondere die Haltezeiten 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



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.



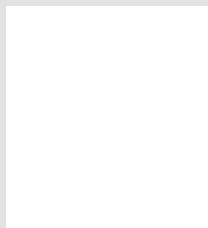
Zum Autor

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



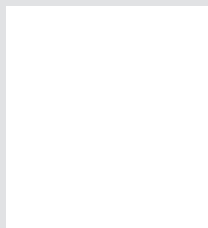
Zum Autor

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 der INIT Group in Karlsruhe. Er leitet und koordiniert die nationalen und internationalen Forschungsaktivitäten von Init und hatte die MENDEL-Gesamtprojektleitung inne. Zuvor war er mehrere Jahre lang als Leiter sowohl von Geschäftsentwicklungs- als auch Infrastrukturprojekten bei verschiedenen Verkehrsunternehmen tätig.



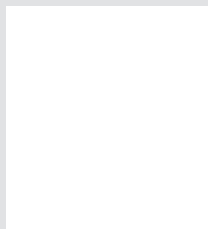
Zum Autor

Thilo Schön (49) ist 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

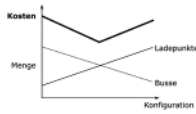
Jan Trumpold (36) ist seit 2014 wissenschaftlicher Mitarbeiter beim Institut für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) e.V. in Berlin. Er beschäftigt sich mit Forschung und Entwicklung im Bereich der Verkehrssteuerung und -koordination; speziell mit der Entwicklung neuer Steuerungsverfahren für Lichtsignalanlagen (LSA). Er ist für das LSA-Labor des DLR in Berlin verantwortlich. Trumpold studierte von 2002 bis 2007 an der Westsächsischen Hochschule Zwickau und schloss das Studium der Verkehrssystemtechnik mit Diplom ab.



Zum Autor

Daniel Wesemeyer (33) ist seit 2017 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (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 adaptive, kooperative Signalsteuerung, Vehicle-to-Infrastructure (V2I) -Kommunikation und Anwendungen von V2I für das Verkehrsmanagement.

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



samtsystem zu finden, werden zunächst alle Haltepunkte mit einer Ladestelle ausgestattet, und es wird 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 Elektrobusen 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. Der Energiebedarf für die Fahrten und die Leerfahrten sind dort genauso in den Knoten als Attribute hinterlegt wie die Energiemenge, die maximal an den Ladeknoten in der jeweils zur Verfügung stehenden Zeit nachgeladen werden kann.

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 An-

nissen: 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, 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, die 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 benötigen und umgekehrt. Dieser Zusammenhang ist qualitativ in Abbildung 2 dargestellt.

Um nun ein Kostenminimum für das Ge-

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

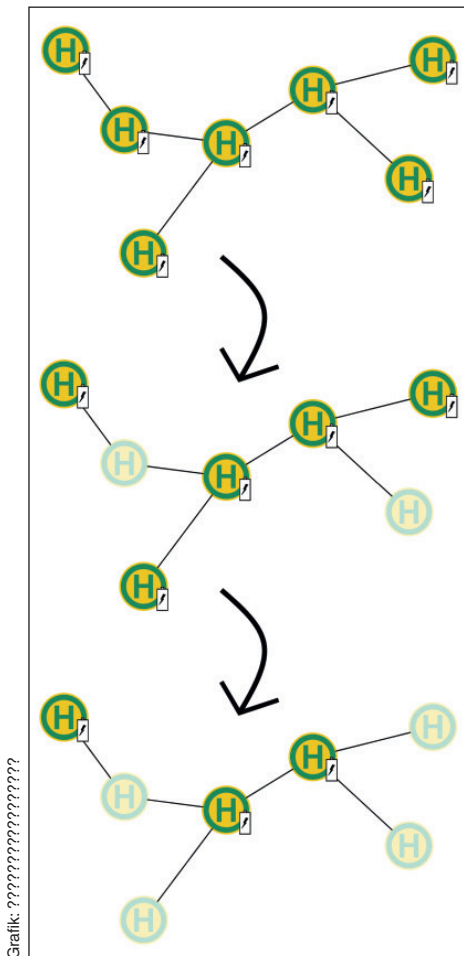


Abb. 3: Sukzessive Reduzierung der Ladestellen bei der Berechnung der kostengünstigsten Ladeinfrastruktur.

mehr betrachtet werden (Bound), um so den Rechenaufwand zu reduzieren.

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 Ereignis-

derung des Batterieladezustands während des Umlaufs mit zu berechnen und davon auch die Wegewahl an Verzweigungsstellen abhängig zu machen.

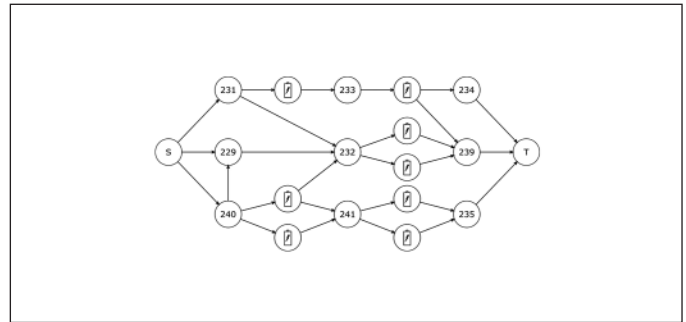
Auf Basis dieses Graphen wurden zwei Verfahren zur Umlaufplanung entwickelt. Das erste Verfahren basiert auf der Column-Generation-Methode, bei der das eigentliche Minimierungsproblem in ein duales Maximierungsproblem umgeformt wird. Für dieses Dualproblem werden neue Variablen (Columns) durch die wiederholte 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 bestimmten Lösungen (hier Umlaufplänen) (Population) findet durch Vererbung von Eigenschaften der Kandidaten mit den besten Werten im Sinne der genannten Minimierungsziele an die nächste Generation verbunden mit zufälligen Mutationen eine evolutionäre Verbesserung der jeweils folgenden Generationen (Populationen) von Umlaufplänen statt. 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.

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



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



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

Abb. 5: Ausschnitt eines Umlaufplans mit Ladevorgängen.



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

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

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

Literatur/Anmerkungen

- [1] Kurcveil, Tamas; Schnieder, Lars: Simulationsbasierte Planungsprozesse für die betriebliche Eingliederung induktiv geladener Busse in den Betrieb. In: DER NAHVERKEHR 32 (2014) 12, Seiten 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, ISSN 0722-8287, 4/2016, S. 6–10, Alba-Verlag
- [3] Büchter, Hubert; Naumann, Sebastian: Einsatz von E-Bussen präzise planen – Hybrides Planungswerkzeug für die Infrastruktur elektrisch betriebener Busse im öffentlichen Nahverkehr, DER NAHVERKEHR, ISSN 0722-8287, 5/2015, S. 17–21, Alba-Verlag
- [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

BT_08_Summary_Head

BT_08_Summary_Text

BT_08_Summary_Head

BT_08_Summary_Text