

Systemtechnologien für elektrische Stadtbusse – die richtige Wahl

Ein Auswahlprozess für Technologie-Alternativen elektrifizierter Busse am Beispiel des E-Bus Berlin Projekts

Vor dem Hintergrund immer weiter steigender Treibhausgasemissionen und der Verschlechterung der innerstädtischen Luftqualität sehen sich öffentliche Nahverkehrsunternehmen vielfach der Aufgabe gegenüber, auch mit ihren Bussen den Übergang in eine nachhaltige Mobilität zu schaffen. Dieser Beitrag stellt einen Auswahlprozess für die verschiedenen Technologie-Alternativen vor und diskutiert dessen Übertragbarkeit auf ein innerstädtisches Busnetz.

Die Autoren: Dietmar Göhlich, Alexander Kunith, Sven Gräbener

Die große Mehrzahl der Unternehmen im öffentlichen Personennahverkehr bedient sich fossiler Brennstoffe zum Betrieb ihrer Busflotten. Beispielsweise fahren in Berlin ca. 1200 hauptsächlich dieselbetriebene Busse, in anderen Metropolen wie New York sogar mehr als 5700. Elektrische Antriebssysteme stellen eine Möglichkeit dar, lokal emissionsfrei und nachhaltigere Mobilitätslösungen umzusetzen. Aufgrund der vorgegebenen Fahrpläne mit regelmäßigen Haltepunkten, geringe Durchschnittsgeschwindigkeiten und kurze Streckenlängen eignen sich Busse besonders gut für eine Elektrifizierung. Allerdings werden die Betreiber dabei mit unterschiedlichen Alternativen konfrontiert.

Drei verschiedene Optionen, sich dieses Themas anzunehmen, werden von den Betreibergesellschaften in Betracht gezogen:

Traditionell bietet sich die Möglichkeit, die Busse über *Oberleitungen* mit elektrischer Energie zu versorgen. Wegen der wesentlichen Veränderung des Stadtbilds durch die Installation von neuen Oberleitungen in modernen Metropolen und entsprechend geringer Akzeptanz dieser Lösung, werden unflexible leitungsgebundene Busse in Berlin, wie in vielen anderen Metropolen, nicht als zielführend angesehen.

Eine weitere Option sind wasserstoffbetriebene *Brennstoffzellenbusse*. Aktuell ist die Brennstoffzellen-Technologie noch relativ teuer. Ein weiteres Problem ist die fehlende Wasserstoff-Infrastruktur, weswegen diese Technologie erst langfristig als wirtschaftlich einsetzbare Variante gesehen wird [1].

Eine kurzfristig umsetzbare Alternative dazu sind *batteriebetriebene* Busse mit einem unabhängigen Energiespeicher an Bord. Weltweit werden derzeit zahlreiche Pilotprojekte initiiert, um die Praxistauglichkeit verschiedenster Systemlösungen zu testen. Bezüglich der Bewertung unter-

schiedlicher Systeme besteht jedoch noch erheblicher Forschungsbedarf. In diesem Beitrag wird für ein konkretes Busprojekt ein entsprechender Auswahlprozess für die verschiedenen Technologie-Alternativen vorgestellt und hinsichtlich einer Übertragbarkeit auf ein gesamtes innerstädtisches Busnetz diskutiert.

Auswahlprozess am konkreten Beispiel

Das Projekt E-Bus Berlin befasst sich mit der Umsetzung einer voll-elektrischen Buslinie im Rahmen des internationalen Schaufensters Elektromobilität in Berlin – Brandenburg und wird durch die Bundesregierung entsprechend gefördert. Insbesondere beabsichtigen die Partner mit dem Vorhaben die Integration von Elektromobilität in die existierenden Strukturen des ÖPNV sowie die Erhebung und Auswertung von relevanten Informationen im Demonstrationsbetrieb unter Realbedingungen. Ziel ist eine mittelfristige Weiterentwicklung hin zu einem nachhaltigen und perspektivisch wirtschaftlichen Betrieb von Elektrobussen.

Eine Übersicht der verfügbaren Technologie-Alternativen für Busse mit integriertem Energiespeicher ist in *Bild 1* dargestellt. Die geringe spezifische Energiespeicherkapazität von Kondensatoren macht eine hohe Anzahl Ladepunkte nötig. Eine Umsetzungsvariante wäre das Nachladen an jeder Bushaltestelle einer Linie. Weiterhin muss sichergestellt werden, dass der Bus vom Betriebshof zum Start der Linie und wieder zurück fahren kann. Aufgrund der hohen Anzahl Ladepunkte und der damit einhergehenden hohen Investitionssumme sowie geringe Flexibilität der Einsatzmöglichkeit wird diese Konfiguration unter den Rahmenbedingungen des E-Bus Berlin Projekts nicht weiter betrachtet. Batterien sind die ausgewählte elektro-chemische Energiespeicheralternative, die wiederum verschiedene Dimensionierungs- und Ladevarianten zulässt.

Eine Übersicht der verschiedenen Technologien mit den entsprechenden Vor- und Nachteilen zeigt *Tabelle 1*.

Bei batteriebetriebenen Bussen bieten sich als Ladestrategien das Laden über Nacht am Betriebshof („Overnight charging“), das Wechseln der Batteriepacks während des Linienbetriebs und das schnelle Nachladen auf der Strecke („Opportunity charging“) an. Alle diese Technologie-Alternativen werden aktuell in verschiedenen Forschungsprojekten u.a. in Deutschland, den USA und China erprobt. Bei der exemplarisch ausgewählten Buslinie für das E-Bus Berlin Projekt ist ein täglicher Energiebedarf von mehr als 600 kWh bereitzustellen. Bei einer spezifischen Energiedichte von 110 Wh/kg [2] resultiert

dies in einem Batteriegewicht von 5500 kg, was die Zuladung des Fahrzeugs bereits ohne Passagiere übersteigt. Batteriewechselstationen haben einen relativ großen Flächenbedarf, der zusätzlich zur vorhandenen Infrastruktur aufgebaut werden müsste [3, 4]. Da dies in vielen Städten, so auch in Berlin, durch hohe Grundstückspreise keine Option ist und zusätzlich hohe Investitionen in den Bau der Station und zusätzliche Energiespeicher bedeutet, ist das sogenannte „Opportunity Charging“ die gewählte Ladestrategie für das E-Bus Berlin Projekt.

Für die „Opportunity charging“-Ladestrategie werden wieder unterschiedliche Ladetechnologien in Betracht gezogen, wie in *Tabelle 2* dargestellt. In dieser Übersicht werden konduktive (manuell oder automatisiert) und induktive Ladekonzepte unterschieden. Bei der Entscheidung für eine Ladetechnologie wurde das induktive System ausgewählt, da dort eine fast unsichtbare Integration in das Stadtbild möglich ist und die Wartungskosten minimiert werden. Der Nachteil im Gesamtladewirkungsgrad führt zu Mehrkosten, die aber mit ca. 0,01 €/km vernachlässigbar bleiben. Im folgenden Abschnitt wird exemplarisch eine Kostenabschätzung für das induktive „Opportunity charging“ Konzept im Vergleich zum konventionellen Dieselbetrieb durchgeführt.

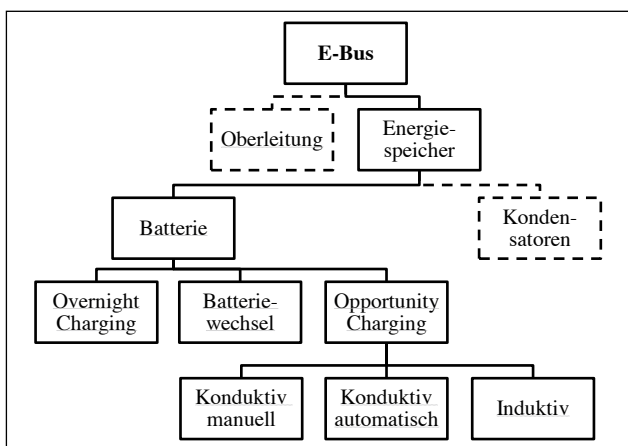


Bild 1: Speicher- und Ladesysteme für voll-elektrifizierte Busse

Kriterien		Overnight charging	Batterie-wechsel	Opportunity charging
Reichweite	Werksangaben	ca. 100–300 km	ca. 100–150 km	ca. 10–20 km
	Realbetrieb	– Deutlich geringer	+ Durch Wechsel unbegrenzt	+ Durch Wiederaufladen unbegrenzt
Benötigte Batteriekapazität		⚡ – > 600 kWh	+ ca. 300 kWh	+ ca. 60 kWh
Flächenverbrauch für Infrastruktur		○ Je Bus eine Ladestation im Depot	⚡ – Wechselstationen und Ladecenter	+ Ladestationen an Endhaltestellen und Depot
Kosten der Infrastruktur		+ Ladestationen im Depot	– Wechselstationen und Ladecenter	○ Ladestationen an Endhaltestellen und Depot
Kosten des Batteriesystems		+ Hoch; relative günstige Einzelbatterien	– Viele redundante Batterien	+ Wenige, relative teure Einzelbatterien
Flexibilität im Streckenmanagement		+ Abhängig von der Reichweite	○ Entlang der Wechselstationen	– Nur zwischen den Ladepunkten
Zusatzaufwand		– Evtl. mehr Busse wegen geringer Reichweite	– Weniger Wechsel als Endhaltestellen	○ Pause evtl. durch Laden nötig
Batterieverschleiß		○ Tiefe Entladung	○ Tiefe Entladung	○ Flache Entladung; viele Zyklen

Tabelle 1: Vergleich verschiedener Ladestrategien für batteriebetriebene Busse

Kostenanalyse E-Bus - Dieselbus

Investitionen in die Fahrzeugflotte, speziell in neue Fahrzeugtypen, stellen für öffentliche Verkehrsbetriebe ein hohes Risiko dar. Auf der einen Seite sollen neu zu beschaffende Fahrzeuge problemlos in bestehende Arbeitsabläufe integriert werden können. Auf der anderen Seite muss gewährleistet sein, dass die neue Technologie langfristig in einem größeren Maßstab im Fuhrpark einsetzbar ist, denn Vielfalt im Fahrzeugbestand führt zu höheren Kosten für die Instandhaltung und den Betrieb. Aus diesem Grund ist eine langfristige Technologieplanung erforderlich, um Fahrzeuginvestitionen, Technologie und Ressourcen basierend auf dem erwarteten Marktverhalten effizient einzusetzen zu können. Strategische Entscheidungen in der Technologieplanung, im Besonderen in der Beschaffung, werden auf Grundlage von Total Cost of Ownership (TCO)-Prognosen getroffen [10]. In *Bild 2* ist ein Diagramm dargestellt, das mögliche TCO-Szenarien eines dieselbetriebenen und eines elektrisch angetriebenen Busses zeigt. Bei dem Elektrobus handelt es sich um einen batteriebetriebenen, durch Induktion an Ladepunkten an den Endhaltestellen aufzuladenden Bus, entsprechend dem im E-Bus Berlin Projekt verwendeten Modell. Die TCO-Berechnung für beide Busvarianten erfolgte für eine Referenzstrecke (60 000 km pro Bus und Jahr, Einsatzdauer 10 Jahre, 2 Ladepunkte, 1 zusätzlich benötigter Transformator) mit innerstädtischem Fahrprofil. Auf Basis der getroffenen Annahmen ist der E-Bus ab dem Jahr 2020 wettbewerbsfähig, ohne dabei Förderungssummen zu berücksichtigen [11].

Ausblick

Die Elektrifizierung von Stadtbussen wird sowohl national als auch international intensiv durch Politik und Unternehmen vorangetrieben. Dies spiegelt sich in den zahlreichen Projektvorhaben in verschiedenen Städten wider. Nach erfolgreichem Praxistest einzelner Buslinien steht als nächster Schritt die Skalierung der Ergebnisse auf eine größere Busflotte an. Hierfür könnten zentrale „Charging Hot-Spots“ geschaffen werden, die idealerweise an den Knotenpunkten mehrerer Buslinien angesiedelt sind. Diese Lösung ermöglicht den effizienten Einsatz der Infrastruktur durch eine hohe Auslastung. Weiterhin ist es vorstellbar, dass zukünftig Nutzfahrzeuge, z.B. Liefer- und Müllentsorgungsfahrzeuge, die vorhandene Ladeinfrastruktur stärker auslasten, so dass weitere Synergien genutzt werden können.

Darüber hinaus sehen wir zusätzlichen Forschungsbedarf in der Kostenanalyse von Ladesystemvarianten. Aktuell ist eine Vergleichbarkeit der Systeme basierend auf monetär quantifizierbaren Kennzahlen nur sehr eingeschränkt gegeben. Diese Problematik wird vom ETS-Team derzeit für verschiedene „Opportunity charging“-Konzepte bearbeitet. Weitere Fragestellungen ergeben sich durch den erhöhten elektrischen Leistungs- und Energiebedarf der urbanen Busflotten im Hinblick auf eine Integration in bestehende Versorgungsnetze. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der Analyse auftretender Leistungsspitzen, einer entsprechenden Dimensionierung der Netzinfrastruktur und deren Anschluss an urbane Energieversorgungsnetze.

QUELLEN

- [1] C. Mohrdieck, A. Burkert. Chancen einer H2-Infrastruktur. ATZ - Automobil-technische Zeitschrift, May 2013, Volume 115, Issue 5, pp 384-389.
- [2] H. Wallentowitz, A. Freialdenhoven. Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011.
- [3] Xinhuanet: „北京继续增加新能源公交车“ (Beijing continues to add new energy buses), online verfügbar: http://news.xinhuanet.com/photo/2010-01/26/content_12875715_1.htm, zuletzt geprüft am 18.04.2013.
- [4] Ankai: „安凯纯电动客车单车运营破11万公里“ (Ankai's pure electric buses exceed 110,000 km of cycling), online verfügbar: <http://www.cnbus.com/news/201202/45758.htm>, zuletzt geprüft am 02.08.2013.
- [5] Chongqing Current: „China's 1st electric bus fast charging station debuts in Chongqing“, online verfügbar: <http://www.chongqingcurrents.com/?p=57434> (2012), zuletzt überprüft am 18.04.2013.
- [6] Proterra: „Products and Innovation“, online verfügbar: <http://www.proterra.com/index.php/products>, zuletzt geprüft am 25.10.2013.
- [7] Opbrid: „Opbrid Busbaar“, online verfügbar: http://www.opbrid.com/index.php?option=com_content&view=article&id=52&Itemid=58&lang=en, zuletzt geprüft am 20.10.2013.
- [8] Conductix-Wampfler: „E-Mobility“, online verfügbar: <http://www.conductix.de/de/maerkte/e-mobility#>, zuletzt geprüft am 15.10.2013.
- [9] Bombardier Transportation: „primove Bus“, online verfügbar: <http://primove.bombardier.com/de/anwendungen/busse/>, zuletzt geprüft am 05.10.2013.
- [10] F. Spangenberg, D. Göhlich. Technology Roadmapping based on Key Performance Indicators. Smart Product Engineering - Proceedings of the 23rd CIRP Design Conference, ISBN 978-3-642-30816, Springer-Verlag, Germany, S. 377-386, 2013.
- [11] D. Goehlich, F. Spangenberg, A. Kunith. Stochastic Total Cost of Ownership Forecasting for innovative Urban Transport Systems. IEEE International

Kriterien	Konduktiv manuell	Konduktiv automatisiert	Induktiv
Infrastruktur aufwand	+ Umrichter, 200 kW-Ladesäule	o Umrichter, Ladestation; bekannte Technik	- Umrichter, Induktives Ladesystem
Stadtbild	- Ladesäulen oder Ladestationen	- Ladestationen mit Oberleitung	+ Ladestationen straßenseitig kaum sichtbar verbaut
Zusätzliche Betriebspersonalkosten	⚡ -	+	+
Zusätzlicher Wartungsaufwand	o	- Wartung der Oberleitung	+
Gesamtladewirkungsgrad	+ ca. 95%	+ ca. 95%	- ca. 90%
Pilot Projekte	[5]	[6], [7]	[8], [9]

Tabelle 2: Vergleich verschiedener Ladetechnologien für „Opportunity charging“-Konzepte

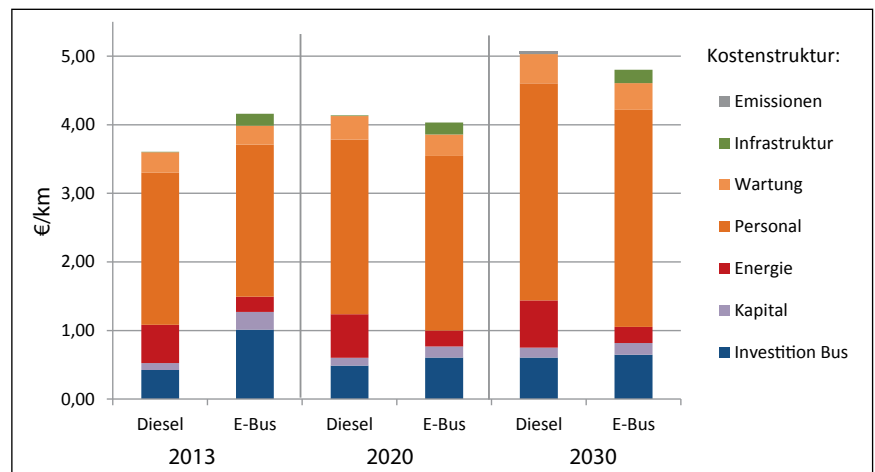


Bild 2: TCO Diesel- und E-Bus für 2013, 2020 und 2030

Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, im Druck.

- [12] Das Forschungsnetzwerk Elektromobilität der TU Berlin, online verfügbar: <http://www.e-mobility.tu-berlin.de/>, zuletzt geprüft am 30.10.2013.

- [13] Die Herausforderung: Energiewende und Verkehr zusammen denken!, online verfügbar: <http://forschungscampus-euref.de/>, zuletzt geprüft am 27.10.2013.



Dietmar Göhlich, Prof. Dr.
Leiter des Fachgebiets für Methoden der Produktentwicklung und Mechatronik der TU Berlin, Koordinator des Forschungsnetzwerks Elektromobilität der TU Berlin
dietmar.goehlich@tu-berlin.de



Alexander Kunith
Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Fachgebiet für Methoden der Produktentwicklung und Mechatronik, „Electrified Transport Solutions“ Team der TU Berlin
alexander.kunith@tu-berlin.de



Sven Gräbener
Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Fachgebiet für Methoden der Produktentwicklung und Mechatronik, „Electrified Transport Solutions“ Team der TU Berlin
sven.graebener@tu-berlin.de

DAS ETS-TEAM

Das „Electric Transport Solutions“ Team um Prof. Dr. Dietmar Göhlich, Leiter des Fachgebiets für „Methoden der Produktentwicklung und Mechatronik“ und Koordinator des „Forschungsnetzwerks Elektromobilität“ der TU Berlin [12], ist von der Realisierbarkeit nachhaltiger Mobilitätslösungen überzeugt und beschäftigt sich hauptsächlich mit der Elektrifizierung von öffentlichem Bus und Wirtschaftsverkehr. Das Team besteht aus vier Wissenschaftlern und mehreren Studenten, die sich der Kopplung einer Mobilitätswende an die Energiewende verschrieben haben. Eingebettet in das „Forschungsnetzwerk Elektromobilität“ haben sie beste Voraussetzungen ihre Forschungsvorhaben in Zusammenarbeit mit den 21 beteiligten Fachgebieten der TU Berlin zu realisieren. Konkrete Forschungsprojekte des Teams sind aktuell der „E-Bus Berlin“ im Rahmen des internationalen Schaufensters Elektromobilität und das „EUREF Forschungscampus: Mobility2Grid“ Projekt, welches vom BMBF gefördert wird [13].