



# Einsteigen und Aufladen

Schnellladung  
als Fahrkarte für  
einen sauberen  
Nahverkehr

BRUCE WARNER, OLIVIER AUGÉ, ANDREAS MOGLESTUE – Sie denken, das Laden von Elektrofahrzeugen ist mit dem Hantieren von Ladekabeln und langen, unproduktiven Wartezeiten verbunden? Das muss nicht so sein. ABB hat zusammen mit mehreren Partnern einen Elektrobus entwickelt, der sich nicht nur automatisch binnen 15 s auflädt, sondern auch eine hohe Transportkapazität und Energieeffizienz bietet. Wenn der Bus eine Haltestelle anfährt, verbindet er sich mit einem Hochleistungs-Ladekontakt und lädt seine Batterien auf, während die Fahrgäste ein- und aussteigen. Der TOSA-Bus, der zurzeit auf den Straßen von Genf im Einsatz ist, stellt nicht nur ein attraktives Verkehrsmittel dar, er bietet auch zahlreiche ökologische Vorteile. Er ist leise, emissionsfrei, verwendet langlebige, kleine Batterien und kommt ohne den Wirrwarr von Oberleitungen und Masten aus, der die Akzeptanz von Trolleybussen häufig mindert. Das System ist konstruktionsbedingt sicher, da die Ladeanschlüsse nur dann unter Spannung stehen, wenn der Bus verbunden ist. Elektromagnetische Felder wie bei induktionsbasierten Ladekonzepten entstehen nicht. Das Demonstrationsmodell erwies sich als so erfolgreich, dass das Konzept nun für die Serienfertigung entwickelt wird.



**D**ie Welt wird immer urbaner. Im Jahr 2008 lebte zum ersten Mal in der Geschichte der Menschheit die Hälfte der Weltbevölkerung in Städten. Für Städte bringt dies eine Vielzahl von Herausforderungen mit sich, zu denen nicht zuletzt die effiziente Abwicklung des Verkehrs gehört. Um einen Verkehrsfarkt zu verhindern und die Luftverschmutzung zu reduzieren, versuchen Planer rund um den Globus, die Nutzung von öffentlichen Verkehrsmitteln zu fördern.

Der öffentliche Personennahverkehr in Städten kann zahlreiche Formen annehmen. Doch sie alle benötigen Energie,

#### Titelbild

Der TOSA Demonstrator Bus ist zurzeit in Genf im öffentlichen Einsatz.

die von einer festen Versorgung in ein bewegliches Fahrzeug übertragen werden muss. Mit Ausnahme einiger besonderer Lösungen erfolgt diese Übertragung auf eine von zwei Arten: Entweder wird die Energie im Fahrzeug gespeichert (normalerweise in Form von Dieselmotorkraftstoff, wie bei einem normalen Bus) oder elektrisch übertragen (was ein durchgängiges Kontaktsystem wie bei Metros, Straßenbahnen und Oberleitungsbussen (Trolleybussen) erfordert). Letztere sind typischerweise auf stark frequentierten Strecken zu finden, auf denen bedeutende Infrastrukturinvestitionen leichter zu rechtfertigen sind. Die erste Lösung ist typisch für weniger stark frequentierte Strecken, wo niedri-

gere Anfangskosten eine flexiblere Festlegung oder Veränderung der Fahrstrecken ermöglichen.

---

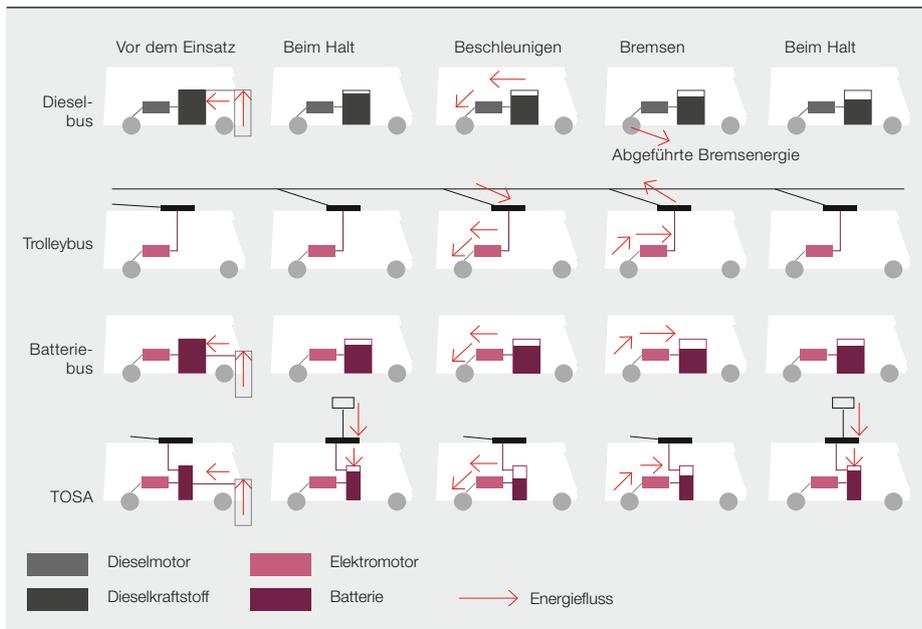
**Beim Bremsen des Busses wird Energie zurückgewonnen, die sonst verloren gehen würde.**

Dieser Status Quo hat seit vielen Jahrzehnten Bestand. Aber wird es auch in Zukunft so sein? Steigende Kraftstoffpreise und die sinkende Akzeptanz von Lärm und Verschmutzung veranlassen Hersteller und Betreiber dazu, über Alternativen zum Dieselantrieb für Busse nachzudenken → 1. Zu den bisher in verschiedenem Umfang umgesetzten Lösungen gehören die Nutzung alternativer Kraftstoffe (z. B. Erdgas), alternative

## 1 Zeichen der Veränderung

- Laut Prognosen der Internationalen Energieagentur (IEA) wird der Ölpreis in absehbarer Zukunft über der Marke von 100 USD bleiben.
- Laut einer Studie von McKinsey wird der Preis von Li-Ionen-Batterien bis 2025 gegenüber dem heutigen Niveau um fast 75 % sinken.
- CO<sub>2</sub>-Abgaben werden überall auf der Welt eingeführt und werden weiter steigen.
- Es besteht ein globaler Druck zur Senkung der Emissionen im Straßenverkehr (z. B. durch die Abgasnorm EURO 6).
- Fortschritte in der Leistungselektronik (höhere Schaltfrequenzen, geringere Verluste, kompaktere Stromrichter) erhöhen die Rentabilität von vollständig elektrischen Lösungen.

## 2 Betriebsarten im Vergleich



## 3 Alternativen zu Oberleitungen

Die Idee, Fahrzeuge über andere Wege als Oberleitungen mit Strom zu versorgen, ist nicht neu. Anfang des 20. Jahrhunderts nutzten mehrere Straßenbahnen eine Unterleitung mit einer in eine schmale Rille in der Straße eingelassenen Stromschiene. Allerdings konnte die Rille leicht durch Fremdkörper blockiert werden, und die Gefahr von Stromschlägen für andere Straßenbenutzer konnte nicht ausgeschlossen werden. In den vergangenen Jahren haben einige Hersteller das Konzept wieder aufgegriffen, wobei die Rillenschiene durch eine sicherere und fortschrittlichere kontakt- oder induktionsbasierte Übertragung ersetzt wurde. Durch den Einsatz von Batterien kann verhindert werden, dass die teure

Ausrüstung entlang der gesamten Strecke installiert werden muss. Durch Induktion können auch andere Straßenfahrzeuge wie Busse geladen werden. Doch das System birgt mehrere Nachteile wie Energieverluste beim Laden und hohe Kosten für die Verlegung der Ladeinfrastruktur. Das Schnellladesystem von ABB ist von Natur aus sicher, da die Ladepunkte nur bei geschlossenem Bus aktiv sind → 5. Da eine direkte elektrische Verbindung verwendet wird, sind jegliche Bedenken über elektromagnetische Felder unbegründet. Die Tatsache, dass keine schwere Ausrüstung unter der Straße verlegt werden muss, vereinfacht die Installation.

Antriebskonzepte (z. B. Hybridbusse), Batteriebusse und Trolleybusse. Die letzten drei nutzen Elektromotoren, d. h. es besteht die Möglichkeit, beim Bremsen Energie zurückzugewinnen, die sonst verloren gehen würde. Doch Rückgewinnung ist nicht das Gleiche wie Wiederverwendung. Hybrid- und Batteriefahrzeuge nutzen Batterien, um die Diskrepanz zwischen Energieangebot und -nachfrage zu überbrücken, während dies bei Trolleybussen von den Umspannwerken und dem Stromnetz übernommen wird → 2.

Batteriebusse sind mit Einschränkungen verbunden. Trotz erheblicher Fortschritte auf dem Gebiet der Batterietechnik ist ihre Energiedichte um ein Vielfaches geringer als die von Dieselkraftstoff<sup>1</sup>. Das zusätzliche Gewicht der Batterien wirkt sich negativ auf den energetischen Fußabdruck des Busses aus, während der Platz, den sie benötigen, die Fahrgastkapazität reduzieren kann. Dem kann durch den Einsatz von weniger Batterien (und häufigerem Aufladen) entgegengewirkt werden, doch zusätzliche Stopps an der Ladestation sind mit Zeit- und Produktivitätseinbußen verbunden.

Dies gilt nicht für den Trolleybus. Die Tatsache, dass er ohne ein größeres Energiespeichersystem auskommt, reduziert das Fahrzeuggewicht und ermöglicht eine bessere Beschleunigung bei gerin-

### Fußnote

- 1 Die Energiedichte von Dieselkraftstoff liegt bei 46 MJ/kg, die von wiederaufladbaren Batterien unter 1 MJ/kg.



**Das TOSA-Projekt wurde von folgenden vier Unternehmen ins Leben gerufen:**

- TPG, die Genfer Verkehrsbetriebe
- OPI, das Amt für Industrie- und Technologieförderung der Region Genf
- SIG, der Genfer Energieversorger
- ABB (ABB Sécheron Ltd.)

Daher der Name TOSA, der gleichzeitig für „Trolleybus Optimisation Système Alimentation“ (optimiertes Trolleybus-Ladesystem) steht.

**Zu den weiteren Projektpartnern gehören:**

- Palexpo (Messezentrum) und Flughafen Genf
- Hochschule für Landschaftsgestaltung, Ingenieurwesen und Architektur (Hepia) Genf, Architekturentwurf der Haltestellen
- HESS, Hersteller des Busses
- Kanton Genf, Bundesamt für Energie, Bundesamt für Straßen
- Eidgenössisch Technische Hochschule Lausanne (EPFL) und Fachhochschule Arc (HE-Arc)

Oberleitungen sind teuer in der Installation und Wartung und aufgrund ihrer Sichtbarkeit nicht immer willkommen.

#### 5 An den Haltestellen wird der Bus über seine dachmontierten Kontakte aufgeladen, die sich lasergesteuert mit der Stromschiene verbinden.



gerem Energieverbrauch. Der Nachteil liegt (oder besser hängt) in den Oberleitungen. Diese sind teuer in der Installation und Wartung und aufgrund ihrer Sichtbarkeit nicht immer willkommen → 3.

Gibt es eine Möglichkeit, einen Batteriebus zu betreiben, ohne große, schwere Energiespeicher einsetzen zu müssen oder ihn zum vollständigen Wiederaufladen häufig außer Dienst nehmen zu müssen?

#### Fahrgäste transportieren statt Batterien

Ein grundlegender Unterschied zwischen Bussen und PKWs ist, dass Busse feste Fahrstecken folgen. Die Frage der „Reichweite“, die bei Elektroautos eine wichtige Rolle spielt, reduziert sich auf die wesentlich einfacher zu handhabende „Entfernung bis zur nächsten Lademöglichkeit“. Da Busse in regelmäßigen, vorhersagbaren Abständen anhalten,

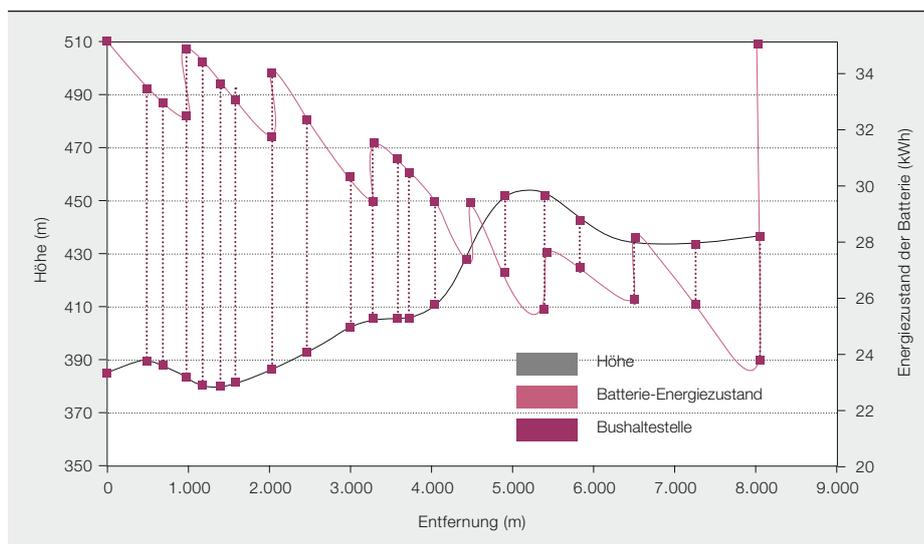
können Ladepunkte an den Haltestellen platziert werden. Kann der Bus seine Batterie an diesen Punkten wiederaufladen, sind keine großen und schweren Batterien notwendig, d. h. das Fahrzeug wird leichter, agiler, energieeffizienter und bietet mehr Platz für Fahrgäste. Wenn die Ladezeit zudem auf die Zeit begrenzt werden kann, die der Bus ohnehin zum Halten benötigt, können negative Auswirkungen auf den Fahrplan vermieden werden. Der TOSA-Bus ist eine auf diesem Ansatz basierende Lösung, die ABB in Zusammenarbeit mit mehreren Partnern → 4 entwickelt hat.

#### Schnellladen und Smart Grid

Das Schnellladen (400 kW, 15 s) der Batterien mit hoher Leistungsdichte kann zu Lastspitzen führen, die sich negativ auf das lokale Stromnetz auswirken. Die Schnellladestation glättet den Bedarf durch das Laden von Superkondensato-

Der TOSA Demonstrator Bus ist bis April 2014 auf einer kurzen Strecke in Genf im öffentlichen Einsatz.

## 6 Kurze Nachladungen helfen dabei, den Ladezustand der Batterie zu erhalten.



ren über einen Zeitraum von einigen Minuten, wobei ein geringerer Strom aus dem Netz bezogen wird. Da dieser Strom bis zu 10-mal niedriger ist als ohne Speicherung, kann der Anschluss mit einer kostengünstigeren und verfügbareren, leistungsarmen Versorgung hergestellt werden. Außerdem ist das Wiederaufladen der Superkondensatoren zeitlich so abgestimmt, dass diese über längere Zeiträume entladen bleiben, wenn der Busbetrieb mit niedrigerer Frequenz läuft. Da Superkondensatoren durch höhere Spannungen altern, kann durch diese „intelligente“ Funktion die Lebensdauer der Superkondensatoren verdoppelt werden.

Da an den Haltestellen nur begrenzte Zeit zur Verfügung steht (Fahrgäste steigen typischerweise binnen 15 bis 25 s ein und aus), sollte beim Herstellen der elektrischen Verbindung so wenig Zeit wie möglich verloren gehen. Das Anschließen des Busses erfolgt in weniger als einer Sekunde. Beim Anfahren der Haltestelle ist es die Aufgabe des Fahrers, die Sicherheit der Fahrgäste und Fußgänger zu gewährleisten und den umliegenden Verkehr im Auge zu behalten. Um den Fahrer nicht mit zusätzlichen Anforderungen zu belasten, ist das Anschlussystem automatisch. Ein Laser richtet den beweglichen Kontakt auf dem Dach des Busses an der festen Aufnahme an der Haltestelle aus → 5. Die Verbindung wird hergestellt, sobald die Bremsen betätigt sind.

Durch die Höhe der Aufnahme über der Straße und die Tatsache, dass diese nur bei vorhandenem Bus unter Spannung steht, ist die Lösung in sich sicher.

### Der Fahrplan bestimmt Betrieb und Wirtschaftlichkeit

Die Kosten für einen Busbetrieb sind stark abhängig von den Gehältern der Fahrer, der Fahrplanfrequenz und der Flottengröße. Daher sollte bei einem Umstieg von Diesel auf einen elektrischen Antrieb weder die kommerzielle Durchschnittsgeschwindigkeit sinken, noch eine Vergrößerung der Flotte erforderlich sein, um den gleichen Service bieten zu können.

Diese Anforderung führte zur Konzeption von zwei Arten von Ladestationen entlang der Strecke: der sogenannten Flash-Station und der Terminal-Station. Die Flash-Station liefert wie beschrieben einen kurzen, hohen Energieschub. Doch 400 kW für 15 s reichen nicht aus, um die Batterien vollständig wiederaufzuladen → 6. Daher erhält der Bus an den Endstationen, an denen er ohnehin länger hält (damit der Fahrer eine Pause einlegen kann und um Zeitpuffer für eventuelle Verspätungen vorzuhalten) längere Ladungen von drei bis fünf Minuten bei 200 kW. Die zum Aufladen an den Endstationen benötigte Zeit sollte also so ausgelegt sein, dass keine Gefahr besteht, dass sich der Bus verspätet oder nicht mehr in der Lage ist, eine Verspätung aufzuholen.

## 7 Die Technologie wird auf einer kompletten Buslinie in Genf eingeführt.

- 11 Gelenkbusse (18 m)
- Zwei angetriebene Achsen (von insgesamt drei)
- Die Batterien im Bus entsprechen etwa denen von zwei Elektroautos (38 kWh).
- Jeder Bus hat eine Kapazität von 134 Fahrgästen.
- Die Energie für das Laden wird dem 400-VAC-Niederspannungsnetz entnommen.

Die Terminal-Ladestation besteht aus einem einfachen 12-Puls-Diodengleichrichter. Dieser wandelt die ankommende Wechselspannung ähnlich wie bei gleichstrombetriebenen Eisenbahnen, Straßenbahnen oder Trolleybussen in Gleichspannung um. In diesem Fall wird eine Spannung von 500 V verwendet. Die Lösung ist einfach und kostengünstig und dabei äußerst zuverlässig.

Die Flash-Ladestationen besitzen einen komplizierteren, aber flexibleren elektronischen Aufbau mit einem steuerbaren Gleichrichter zum Aufladen der Superkondensatoren. Dieser ist in der Lage,

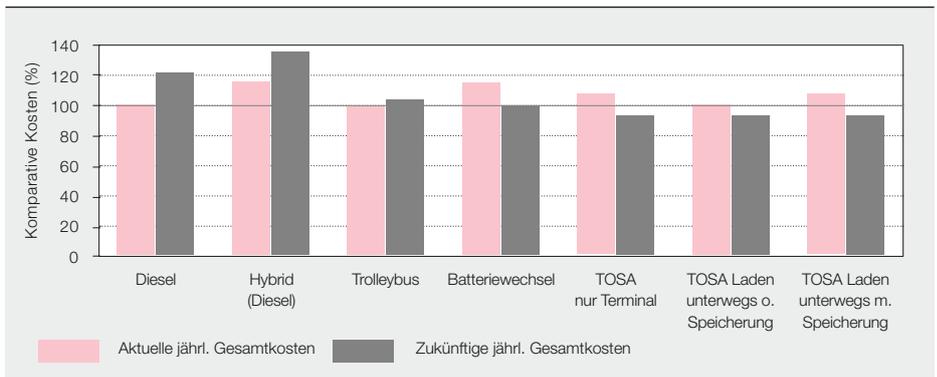
## Der TOSA-Bus eignet sich naturgemäß zur Nutzung erneuerbarer Energien.

den Ladestrom zu regulieren. Wenn sich der Bus mit der Station verbindet, schließt der Controller einen Kontakt auf der Ausgangsseite der Superkondensatoren, um diese in den Bus zu entladen.

Während des Fahrbetriebs erhalten die Batterien weitere Nachladungen, wenn der Bus bremst. Anders als bei einem reibungsbasierten System, das die gesamte kinetische Energie in Wärme umwandelt, können die Motoren des Busses in den Generatorbetrieb umschalten und einen Großteil der Energie an die Batterien zurückführen → 2.

Die Batterieladung für eine typische Fahrt ist in → 6 dargestellt. Das Diagramm zeigt,

## 8 Das Schnellladen stellt bereits eine konkurrenzfähige Lösung dar, deren Wettbewerbsfähigkeit in Zukunft weiter steigen wird.



Nicht berücksichtigt wurden Kosten, die für alle Betriebsarten gleichermaßen gelten (z. B. für den Fahrer)

wie die Batterien an den Haltestellen nachgeladen werden und an den Endstationen eine größere Ladung erhalten.

Es gibt noch eine dritte Art von Ladestation für das Depot, wo eine längere Aufladung erfolgt, um die erforderliche Energie für die Fahrt zwischen dem Depot und der Dienststrecke bereitzustellen. Da im Depot mehr Zeit zur Verfügung steht, ist keine Flash-Ladestation erforderlich. Der Bus wird per Kabel mit einem eigenen Stromanschluss verbunden. Insgesamt können vier Busse an eine Depot-Ladestation angeschlossen werden, die die Busse der Reihe nach auflädt. Der elektrische Aufbau ist identisch mit dem der Terminal-Ladestation (ein 12-Puls-Diodengleichrichter), aber die Nennleistung ist mit 50 kW geringer als die der Terminal-Ladestation (200 kW).

### Erneuerbare Energie

Der TOSA-Bus eignet sich auch zur Nutzung erneuerbarer Energien. Im Gegensatz zu klassischen Elektrofahrzeugen, die typischerweise aufgeladen werden, wenn sie am Abend heimkehren, lädt sich der Bus während des Tages auf und ist somit in der Lage, Sonnenenergie direkt zu nutzen. Die Fähigkeit der Schnellladestationen, für kurze Zeit Energie zu speichern und Ladespitzen zu glätten, kann das System gegen kurzzeitige Schwankungen in der Solarstromerzeugung schützen.

### Demonstration in Genf

Der TOSA Demonstrator Bus ist zurzeit auf einer kurzen Strecke in Genf (zwischen dem Flughafen und dem Veranstaltungszentrum PALEXPO) im öffentlichen Einsatz. Die Testphase läuft bis April 2014, und der Bus funktioniert

bisher fehlerlos. Als nächstes soll die Technologie auf einer kompletten Buslinie in Genf eingeführt werden → 7.

### Eine wettbewerbsfähige Lösung

Das ABB-Schnelladesystem für Busse ist bereits heute wettbewerbsfähig und wird in Zukunft noch wettbewerbsfähiger sein. Ein Vergleich der Wirtschaftlichkeit des Schnellladesystems mit anderen Modellen ist in → 8 dargestellt. Das prognostizierte zukünftige Szenario geht von steigenden Kraftstoffkosten und CO<sub>2</sub>-Abgaben sowie sinkenden Kosten für Batterien aus.

Angesichts der sinkenden Attraktivität von Dieselmotoren – sowohl aus finanzieller Sicht als auch im Hinblick auf den Schadstoffausstoß – sowie der Tatsache, dass sich Verkehrsbetriebe nach modernen, attraktiven Formen des Transports umsehen, die ohne Verdrahtung der Straßen auskommen, ist das Schnellladesystem bestens positioniert, um sowohl vorhandene Trolleybus- als auch Dieselbus-Linien im städtischen Bereich zu ersetzen.

### Bruce Warner

#### Olivier Augé

ABB Sécheron S.A.

Genf, Schweiz

bruce.warner@ch.abb.com

olivier.auge@ch.abb.com

### Andreas Moglestue

ABB Review

Zürich, Schweiz

andreas.moglestue@ch.abb.com