

Batterieantrieb oder doch eher Brennstoffzelle?

Ersatz des Dieselantriebs im städtischen und regionalen Busverkehr

Prof. Dr. Martin Streichfuss, Aachen; Andreas Schwillig, Lic. Oec., MBA, München

Die aktuellen Diskussionen über den Klimawandel und die Kohlendioxidemissionen rücken unter anderem die großen Flotten von Stadtverkehrsbussen mit Dieselantrieb in den Fokus. Der Vorreiter in Bezug auf den Einsatz von Bussen mit alternativem Antrieb ist eindeutig schon seit mehreren Jahren China. Insgesamt sind dort heute mehr als 400.000 Batterie-Elektrobusse im Einsatz. Einige Städte haben ehrgeizige Ziele bei der Umsetzung der Elektrifizierung der Busflotte, Shenzhen hat bereits vollständig auf Elektrobusse umgestellt, allein dort sind zirka 16.000 dieser Fahrzeuge im Einsatz. Gefördert wird die Anschaffung der Busse durch die Zentral- und lokale Regierung mit in der Regel insgesamt 50 Prozent des Kaufpreises. Auch Brennstoffzellenbusse werden in die Förderung der

chinesischen Regierung aufgenommen, Ende 2018 waren rund 1400 im Einsatz [1].

In anderen Teilen der Welt und Europa spielen alternative Antriebe bei Bussen bislang eine untergeordnete Rolle. Etwa 4000 solcher Busse werden in Europa betrieben – ein weltweit verschwindender Anteil, auch wenn die Wachstumsraten bei den Zulassungen hoch sind. In Deutschland sollen gemäß dem Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur 2030 alle im öffentlichen Nahverkehr in Deutschland eingesetzten Busse emissionsfrei sein. Auch wenn die Zahl der im Betrieb befindlichen Batterie- und Brennstoffzellenbusse in Deutschland derzeit noch weniger als 300 beträgt, so testet doch eine große Anzahl von Verkehrsbetriebern die Praxistauglichkeit im Alltag.

Mehrere Städte haben Ziele für die Elektrifizierung ihrer Busflotten verabschiedet, so Hamburg mit einer kompletten Umstellung der Flotte bis Anfang der 2030er Jahre, Berlin mit einer Umstellung bis 2030 – im Jahr 2021 sollen bereits 225 Batteriebusse im Einsatz sein. Die Üstra in Hannover will bis 2023 in der Umweltzone komplett elektrisch fahren, viele andere Städte verfolgen ähnliche Initiativen.

Das Angebot der Elektrobusse durch die Hersteller steigt kontinuierlich. Neben Herstellern aus China, den Niederlanden, Schweden, Polen und der Türkei bieten nun auch Daimler und MAN vollelektrische Busse an. Auch Gelenkbusse werden seit Kurzem offeriert. Mehrere Hersteller haben außerdem Busse mit Schnellladeeinrichtungen über Stromabnehmer sowie

	Reiner Batteriebetrieb	Mischbetrieb Batterie – Oberleitung/Induktionsaufladung	Brennstoffzelle
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> > Hohe Energieeffizienz > Niedrigere Betriebs- und Instandhaltungskosten als Dieselantrieb > Zusätzliche Infrastruktur beschränkt sich auf Depotladestationen (inkl. Transformator, Erweiterung Netzanschluss) 	<ul style="list-style-type: none"> > Beste Energieeffizienz > Größere Reichweite als rein batteriebetriebene Busse oder alternativ kleinere Batterie bei gleicher Reichweite > Nutzung von Stillstandszonen oder hochfrequentierten Beschleunigungszonen zum Aufladen 	<ul style="list-style-type: none"> > Größere Reichweite als batteriebetriebene Busse > Niedrigeres Fahrzeuggewicht als bei Batteriebetrieb > Schnellere Betankung > Zusätzliche Infrastruktur beschränkt sich auf Wasserstofftankstellen
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> > Sehr hohes Gewicht von Batterie und Fahrzeug > Je nach Batteriegröße geringe Reichweite 	<ul style="list-style-type: none"> > Hohes Gewicht von Batterie und Fahrzeug (niedriger als im reinen Batteriebetrieb) > Infrastrukturinvestitionen auf der Strecke 	<ul style="list-style-type: none"> > Insgesamt geringer Wirkungsgrad > Vorurteile gegenüber Betankungsvorgang
Hauptwendungen	<ul style="list-style-type: none"> > Umläufe im Stadtverkehr mit erforderlicher Reichweite von maximal ≈ 250 km > "Geteilte Dienste" mit Auflademöglichkeit in dem Zeitraum dazwischen 	<ul style="list-style-type: none"> > Lange Umläufe im Stadtverkehr (> 250 km) > Regionalverkehr jeweils mit Stillstandszeiten oder elektrifizierten Streckenabschnitten 	<ul style="list-style-type: none"> > Lange Umläufe im Stadtverkehr (> 250 km) > Regionalverkehr > Fernverkehr

Abb. 1: Alternativen zum Dieselantrieb.

Grafiken: Die Autoren



Zum Autor

Prof. Dr. Martin Streichfuss ist Partner bei Roland Berger, wo er viele Jahre das Transportgeschäft weltweit geleitet hat. Seit einem Jahr ist er für die Zusammenarbeit von Roland Berger mit Hochschulen und Forschungseinrichtungen zuständig. Neben seiner Beratungstätigkeit lehrt er an der RWTH Aachen.



Zum Autor

Andreas Schwilling, Lic. Oec., MBA, ist Partner im Competence Center Transportation von Roland Berger in München. Er berät seit mehr als zweieinhalb Jahrzehnten Unternehmen im ÖPNV und Schienenverkehr sowie deren Zulieferer.

Dazu kommen die notwendigen Investitionen in Ladeinfrastruktur und Aufwendungen für die Umstellung der Instandhaltung. Hierfür bestehen jedoch Förderprogramme von Bund und Ländern, welche die Mehrkosten allerdings nicht vollständig ausgleichen. Umfangreiche Daten über Betriebskosten und Energieverbrauch in Deutschland liegen noch nicht vor, die Betriebskosten sind bei internationalen Vergleichen jedoch deutlich – um bis zu zwei Drittel – niedriger als bei Dieselnissen [5]. Unterschiede bei den Strompreisen und der Besteuerung von Dieselnkraftstoff in den Ländern spielen bei den Vergleichen eine erhebliche Rolle.

Bewertung der Umweltauswirkungen

Um die Umweltauswirkungen der verschiedenen Antriebsarten zu vergleichen, ist es zunächst notwendig, den Gesamtenergiebedarf zu ermitteln. Dieser hängt jedoch vom Einsatzprofil des Busses ab. Als Beispiel kann man den Fall eines besetzten Busses mit einer Masse von 21,5 t betrachten, der auf einer flachen Strecke von 11 km mit 17 Haltestellen verkehrt und diese an sechs Tagen pro Woche alle zehn Minuten und an einem Sonntag alle 30 Minuten bedient, dies jeweils 16 Stunden pro Tag. Zusätzlich wird angenommen, dass der Bus pro Strecke achtmal verkehrsbedingt stoppen und wieder anfahren muss.

Unter diesen Bedingungen hätte der Bus einen nutzbaren Energiebedarf von 79 MJ pro Fahrt. Energie wird benötigt, um den Bus von jeder Haltestelle und nach jedem

Brennstoffzellenbusse in ihrem Programm, die zum Teil im Betrieb erfolgreich getestet wurden [2].

Vorteile der unterschiedlichen Antriebsarten

Ein Batteriebus mit einer Ladekapazität von 230 bis 280 kWh hat derzeit in Abhängigkeit von Topografie und Energieverbrauch der Nebenaggregate, der je nach Jahreszeit stark schwankt, eine Reichweite von 200–300 km. Diese bestimmt die Einsatzmöglichkeiten. Bei längeren Umläufen muss entweder auf einen Mischbetrieb mit Batterie und Oberleitung oder auf Brennstoffzellenantrieb zurückgegriffen

werden. Abbildung 1 verschafft einen ersten Überblick über die Vor- und Nachteile sowie Einsatzmöglichkeiten alternativer Antriebsarten. Reine Oberleitungsbusse („Trolleybusse“) werden hier nicht behandelt, da die hohen Infrastrukturkosten und die mangelnde Akzeptanz in der Bevölkerung ihren Einsatz weiterhin stark beschränken werden [3].

Betriebswirtschaftlich gesehen sind alle alternativen Antriebsformen mit derzeit noch erheblich höheren Anschaffungskosten für die Busse verbunden (etwa das 2,5-fache [4]); möglicherweise wird sich der Kostennachteil abhängig von zukünftigen Stückzahlen bei der Produktion noch verringern.

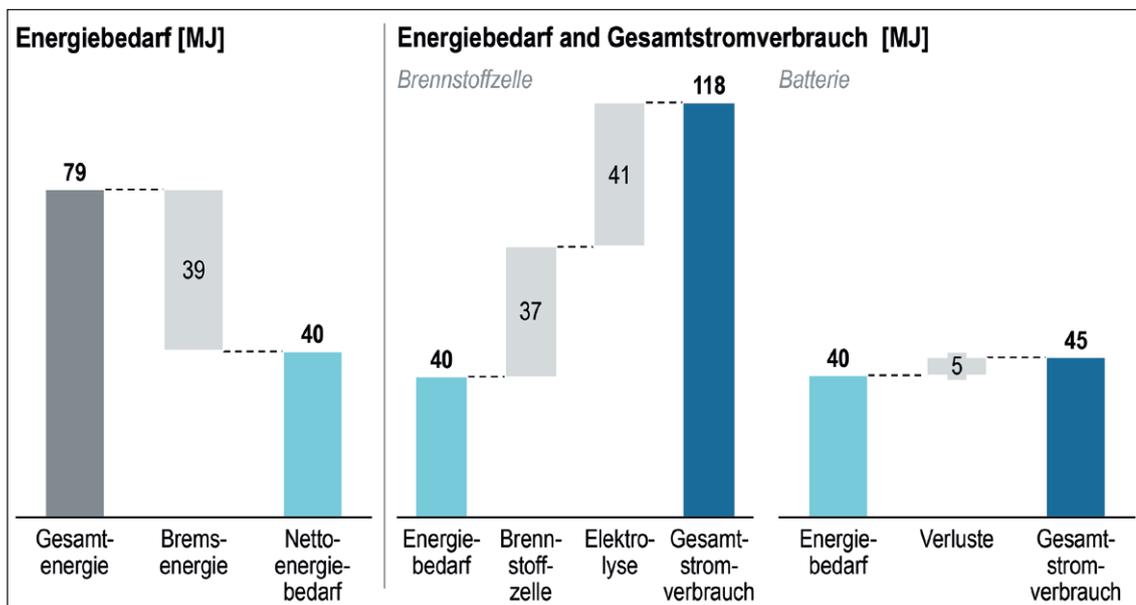


Abb. 2: Vergleich Gesamtenergiebedarf (pro Fahrt).

verkehrsbedingten Stopp zu beschleunigen und um Reibung und Widerstand während der Fahrt zu überwinden. Bei einem Batterie- oder Brennstoffzellenbus kann die beim Beschleunigen aufgewendete Energie beim Bremsen teilweise zurückgewonnen werden, wodurch der Nettoenergiebedarf auf 40 MJ reduziert wird. Dies bedeutet eine erhebliche Einsparung des Primärenergieverbrauchs und der damit verbundenen CO₂- und anderen Schadstoffemissionen (Abb. 2).

Bei der Betrachtung des Energieeinsatzes für Brennstoffzellenbusse muss der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle berücksichtigt werden. Es ist auch wichtig zu beachten, wie der Wasserstoff erzeugt wird; so erhöhen Verluste bei der Wasserstoffherzeugung durch Elektrolyse den Gesamtenergiebedarf (Abb. 2).

Bei der modellbasierten Bestimmung der CO₂-Emissionen eines Dieselmotors kann der Primärenergieeinsatz aus der benötigten nutzbaren Energie auf Basis der

Wirkungsgrade von Motor und Getriebe berechnet werden. Daraus wird dann aus der Wärmeenergie des Kraftstoffs die benötigte Kraftstoffmasse berechnet, aus der wiederum die CO₂-Emission bei der Verbrennung bestimmt werden kann. Für die hier angenommene Strecke belaufen sich die CO₂-Emissionen für den Dieselantrieb auf 16 kg pro Fahrt, was 1001 Tonnen pro Jahr entspricht.

Im Falle eines Batterieantriebs müssen bei der Ermittlung des Gesamtenergiebedarfs die Energieeffizienz der Batterie (Coulomb-Effizienz), die Effizienz der Batterieladung und die Effizienz der Kraftübertragung berücksichtigt werden. Der CO₂-Ausstoß hängt außerdem von den Stromquellen ab, die zur Stromerzeugung verwendet werden. Gleiches gilt natürlich auch, wenn man die Teile der Strecke mit einer Oberleitung versieht; in der hier diskutierten Modellrechnung wurde angenommen, dass beim Oberleitungsbetrieb 30 Prozent des Strombedarfs über Oberleitungen gedeckt werden kann.

Die Art der Wasserstoffherzeugung ist ein Schlüsselfaktor für den Wasserstoffantrieb. Bei einem Elektrolysewirkungsgrad von 65 Prozent wäre es sinnvoll, dieses Verfahren zur Wasserstoffherzeugung einzusetzen, wenn die CO₂-Emissionen im Zusammenhang mit dem bei der Produktion verwendeten Strom 200 g/kWh nicht überschreiten. Eine alternative Option ist die Dampfreformierung, bei der der Wasserdampf durch eine mehrstufige chemische Reaktion mit einem Kohlenwasserstoff, in der Regel Methan, in reinen Wasserstoff und CO₂ umgewandelt wird. Die Dampfreformierung erzeugt rund 10 kg CO₂ pro kg erzeugtem Wasserstoff, was weitgehend unabhängig vom Energieeinsatz ist.

Natürlich müssen auch der Energieverbrauch und die damit verbundenen CO₂-Emissionen bei der Herstellung der Batterien selbst berücksichtigt werden. Für die Beispielanwendung wäre eine Batterie mit einer Kapazität von zirka 320 kWh für den reinen Batteriebetrieb erforderlich, wenn der Bus während der Einsatzzeit nicht

ANZEIGE



... DURCH DIE STADT.

Kiepe Electric setzt weltweit mit zuverlässigen elektrischen Systemen die Impulse für den öffentlichen Nahverkehr. Wir liefern komplette Ausrüstungen für elektrisch betriebene Fahrzeuge wie Straßen- und Stadtbahnen, U-Bahnen, Regionalbahnen sowie alle Arten von Elektrobussen und insbesondere mit „In Motion Charging“ (IMC®). Damit stehen wir seit Jahrzehnten für nachhaltige, umweltfreundliche und zukunftsweisende Lösungen mit hoher Verfügbarkeit. | www.kiepe.knorr-bremse.com |

KIEPEELECTRIC 

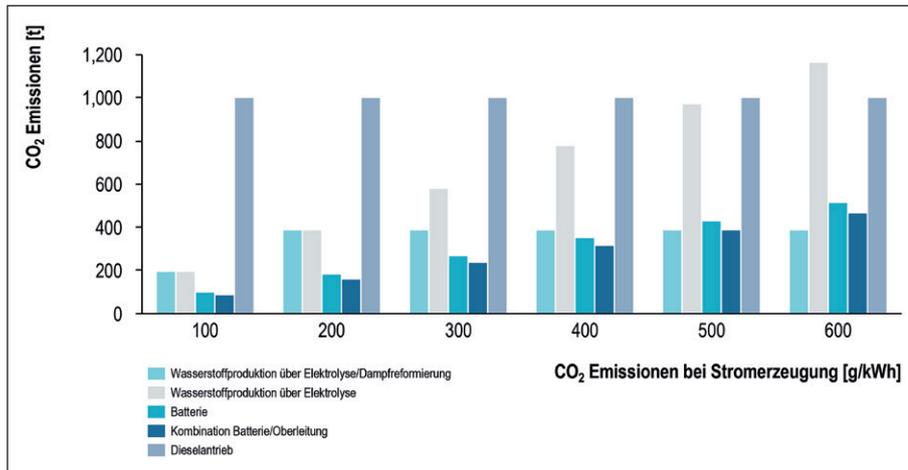


Abb. 3: Vergleich CO₂-Emissionen (p. a.).

geladen werden soll, für den Fall einer Teilaufladung über Oberleitungen reduziert sich die Batteriekapazität auf 220 kWh. Für den Brennstoffzellenbus wäre eine Batteriekapazität von rund 4 kWh ausreichend, um die regenerierte Bremsenergie zu speichern und wieder abzugeben.

Abbildung 3 fasst die Ergebnisse der Berechnungen zusammen. Sie zeigt, wie sich das Verhältnis der CO₂-Emissionen zwischen den alternativen Antriebstechnologien in Abhängigkeit von der Zunahme der durchschnittlichen Emissionen aus der Stromerzeugung verändert. Aus naheliegenden Gründen bleiben die Emissionen des Dieselantriebs konstant. Beim Wasserstoffantrieb bleiben die Emissionen jenseits eines CO₂-Ausstoßes von 200 g/kWh bei der Stromerzeugung konstant, weil Wasserstoffherzeugung mit der Dampfreformierung unterstellt wird. Für den Fall, dass

man auch bei hohen CO₂-Emissionen in der Stromproduktion den Wasserstoff mit Elektrolyse erzeugt, steigen die Emissionen sogar über diejenigen an, die für den Dieselantrieb berechnet wurden.

Die Unterschiede zwischen den beiden Varianten eines elektrischen Antriebs und des Wasserstoffantriebs zeigen sich insbesondere bei der „grünen“ Stromerzeugung. Abbildung 4 zeigt die Unterschiede in Abhängigkeit von dem CO₂-Ausstoß in der Produktion von Fahrstrom oder bei der Elektrolyse im Bereich bis 120 g/kWh. Die deutlich höheren Emissionen für den Wasserstoffantrieb sind auf die oben genannten Effizienzverluste zurückzuführen. Der Batterieantrieb hat gegenüber dem Oberleitungsbetrieb Nachteile durch den Energiebedarf bei der Batterieproduktion und durch höhere Ladeverluste. In unserem Beispiel wurde angenommen, dass der bei der Batterieproduktion ver-

brauchte Strom mit einer CO₂-Emissionsrate von 500 g/kWh erzeugt wurde.

Natürlich ist Kohlendioxid nicht das einzige Treibhausgas, und die Emission anderer Schadstoffe wie Stickoxide oder Partikel ist ein Problem beim Dieselantrieb. Die Emissionsrate hängt stark von der Abgasbehandlung des Dieselmotors oder bei der Stromerzeugung ab; jedenfalls haben alternative Antriebssysteme deutliche Vorteile gegenüber dem Dieselantrieb. Auch die Lärmemissionen sind deutlich niedriger.

Umgekehrt ist es beim Batterie- und Wasserstoffantrieb auch notwendig, den Rohstoffeinsatz für die Batterieproduktion zu berücksichtigen. Im vorliegenden Beispiel wären 332 kg reines Lithium erforderlich, um die Batterien für die im oben geschilderten Anwendungsfall erforderlichen acht Batteriebusse herzustellen, während für die kleineren Batterien, die in den Wasserstoffbussen verwendet werden, nur 3,2 kg benötigen würden.

Fazit

Aufgrund des Nachteils der zwei Energieumwandlungen bei Brennstoffzellenbussen sind Batteriebusse ökonomisch und ökologisch vorteilhafter. Eine Aufladung mit Oberleitung auf Teilen der Strecke und an Haltepunkten mit vorgesehenen Pausenzeiten für den Fahrer ermöglicht eine Verlängerung der Reichweite oder eine Verringerung der Batteriekapazität und damit des Gewichts und Energieverbrauchs. Weiterentwicklungen in der Batterietechnologie (Kapazität, Ladegeschwindigkeit) werden den reinen Batteriebetrieb noch attraktiver machen.

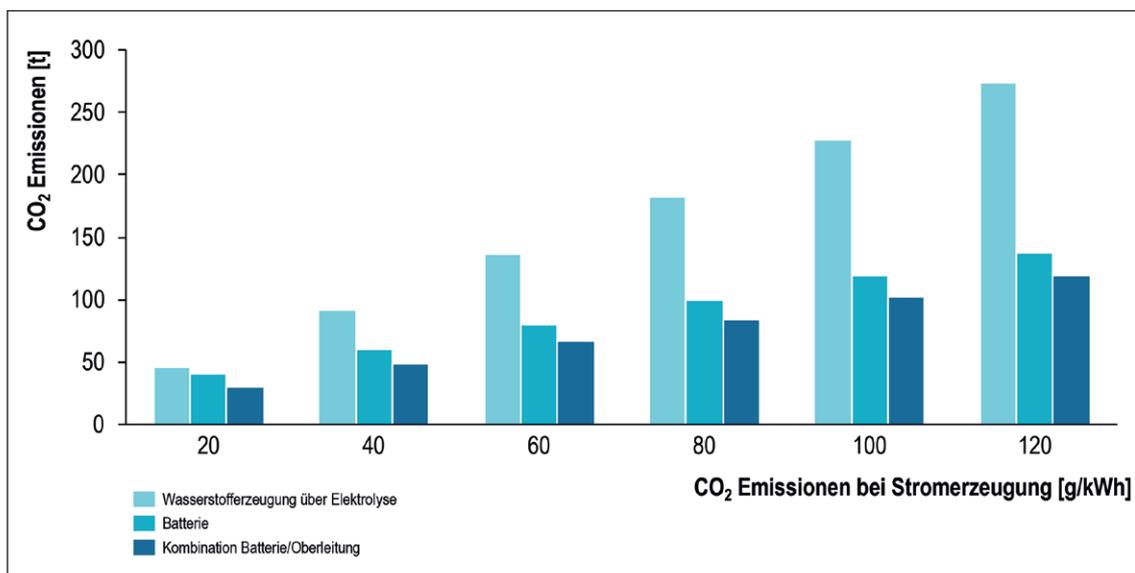


Abb. 4: Vergleich der CO₂-Emissionen (p. a.) bei niedrigen Emissionen bei der Stromerzeugung.

Lange Umläufe ohne ausreichende Lademöglichkeiten auf der Strecke werden die Einsatzbereiche für Brennstoffzellenbusse bilden. Deutlich höhere Anschaffungskosten bei den derzeit noch niedrigen Stückzahlen für beide alternativen Antriebsarten machen jedoch weiterhin eine öffentliche Bezuschussung erforderlich, damit die Flottenumstellung trotz der beträchtlichen Umstellungsaufwendungen schnell vonstatten geht. Die wesentliche Voraussetzung für einen CO₂-freien Bus-

betrieb im Stadtverkehr ist jedoch bei allen drei alternativen Antriebsarten eine

Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern.

Literatur/Anmerkungen

- [1] Now GmbH, Factsheet: Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie in der Volksrepublik China, Oktober 2019, S. 3
- [2] Zum Beispiel in Brugg in der Schweiz. N. Seraidou, Erfahrungsbericht Brennstoffzellenpostauto. Ein Résumé, 25.05.2016, S. 13.
- [3] Strombasierte synthetische Brennstoffe werden als Alternative ebenfalls nicht dargestellt, da praxisreife Lösungen erst langfristig verfügbar sein werden und ihr Wirkungsgrad für den Antrieb von Kraftfahrzeugen mit 13 Prozent sehr niedrig ist: Vgl. Agora Verkehrswende und Agora Energiewende (2018): Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe: Schlussfolgerungen aus Sicht von Agora. S. 12
- [4] VDV-Zwischenbilanz Elektrobusse, 13.02.2019
- [5] Bloomberg, New/Energy Finance, 29.03.2018. Potkany et. al., Comparison of the Lifecycle Cost Structure of Electric and Diesel Buses

Zusammenfassung/Summary

Batterieantrieb oder doch eher Brennstoffzelle?

Aufgrund der aktuellen Diskussionen über Klimawandel und CO₂-Emissionen kommen zunehmend Batterie- und Brennstoffzellenbusse im Nahverkehr zum Einsatz. Aufgrund des Nachteils der zwei Energieumwandlungen bei Brennstoffzellenbussen sind Batteriebusse, am besten mit Aufladung über Oberleitung auf Teilen der Strecke, ökonomisch und ökologisch vorteilhafter. Lange Umläufe ohne ausreichende Lademöglichkeiten auf der Strecke werden die Einsatzbereiche für Brennstoffzellenbusse bilden. Deutlich höhere Anschaffungskosten für beide alternativen Antriebsarten machen jedoch weiterhin eine öffentliche Bezuschussung erforderlich, damit schnell eine Flottenumstellung erfolgt.

Battery buses or fuel cell buses?

The current discussions about decarbonization of transportation lead to an increasing use of battery buses and fuel cell buses in mass transit. Due to the disadvantage of two energy conversions in fuel cell buses, battery buses, preferably with charging via overhead contact line on parts of the route, are economically and ecologically more advantageous. Long rotations without sufficient charging possibilities on the route will form the key areas of application for fuel cell buses. Significantly higher purchasing prices for the two alternative types of propulsion will, however, continue to require public support to ensure a fast fleet migration.

ANZEIGEN

Besuchen Sie uns: Stand 1F1
 3-5 März 2020
 Karlsruhe Trade Fair Centre
 Karlsruhe

Bereit für Elektromobilität

Integrierte Lösungen für Elektromobilität im ÖPNV.

- eSimulation & ePlanung
- eBetriebshof- & eLademanagement
- eBetriebssteuerung & eReichweitenprognose
- eAnalyse & eReporting

init
 The Future of Mobility

sales@initse.com | www.initse.com
 INIT Group

in tw x f ig yt

KONVEKTA
 The Innovation Company.

Zuverlässig und effizient

Für E-Busse: die Konvekta-CO₂-Wärmepumpen

www.konvekta.com