



DRESDEN

eBusTool – Hilfe bei der Auswahl der richtigen Technologie

Abschluss Symposium der Begleitforschung „Innovative Antriebe im straßengebundenen ÖPNV“

Prof. Dr.-Ing. Thoralf Knotz

Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und
Infrastruktursysteme IVI

Zeunerstraße 38, 01069 Dresden

www.ivf.fraunhofer.de

Sven-Erik Kratz

SEK Strategy Consulting GmbH

Kurfürstendamm 11, 10179 Berlin

www.sek-consulting.de

Berlin, 23.09.2021

Hintergrund

Hilfestellung beim Verstehen und Bewerten

- Fehlendes Wissen in Verkehrsbetrieben, Politik und Gremien
- Fehlende Informationen, z. B.
 - Energie- oder H₂-Verbräuche, realistische Reichweiten
 - Kosten
- „Gefährliches Halbwissen“ nicht unüblich



Lösungsansatz

Zugeschnittene Informationen

■ eBusTool 1

- Niederschwellige Informationsplattform
- Grundwissen
- Informationen zu Kostenstrukturen

■ eBusTool 2

- Technische Analyse von Betriebsabläufen
- Kostenvergleich
- Klimaauswirkung



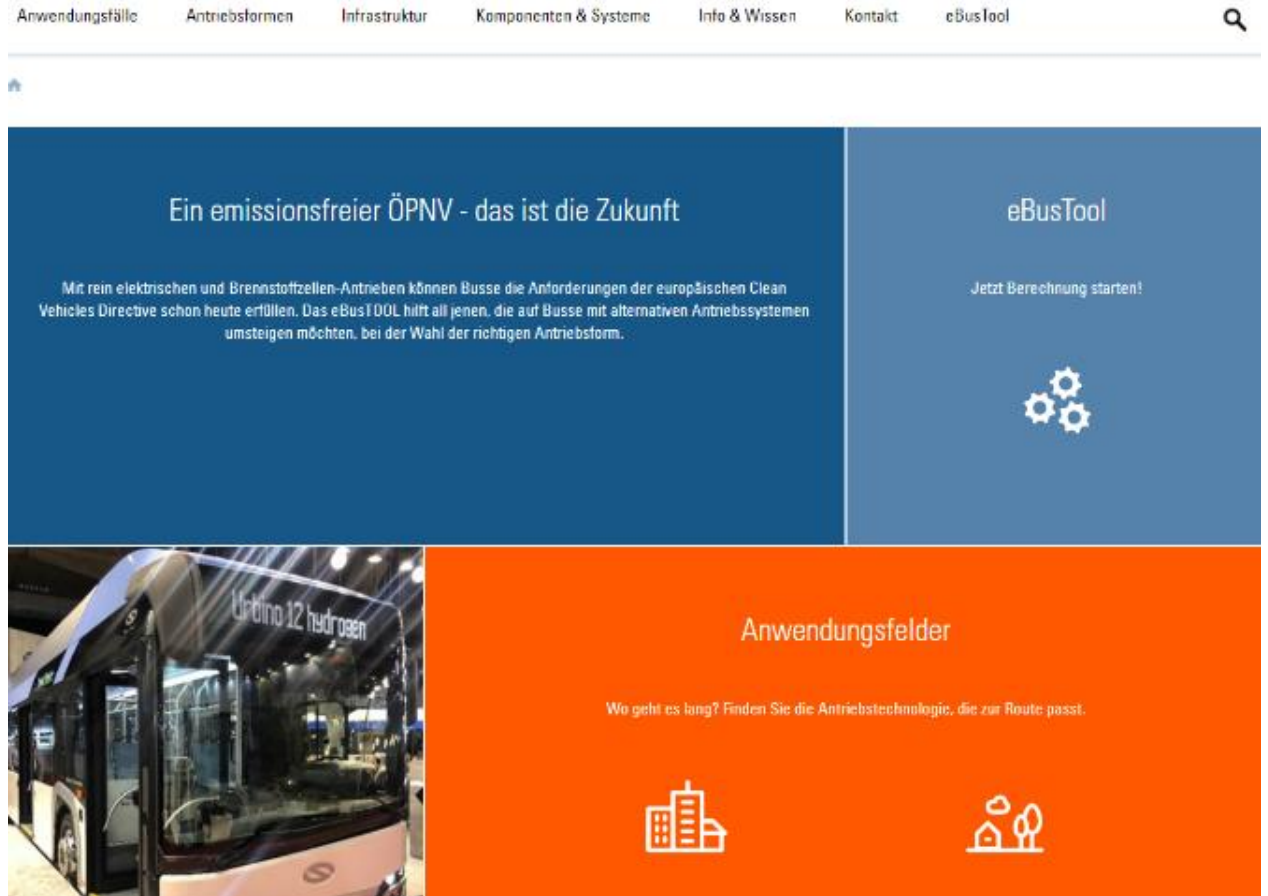
eBusTool 1

Vermittlung von Wissen – Informationen

■ Inhalt

- Grundlagenwissen, kein Vorwissen
- keine Eingangsdaten notwendig
- Informationen zu Kerntechnologien (z. B. Energiespeicher)
- Umfangreiche Daten zu Kostensätzen (Investitionen, Betriebskosten, W&I)

eBusTOOL

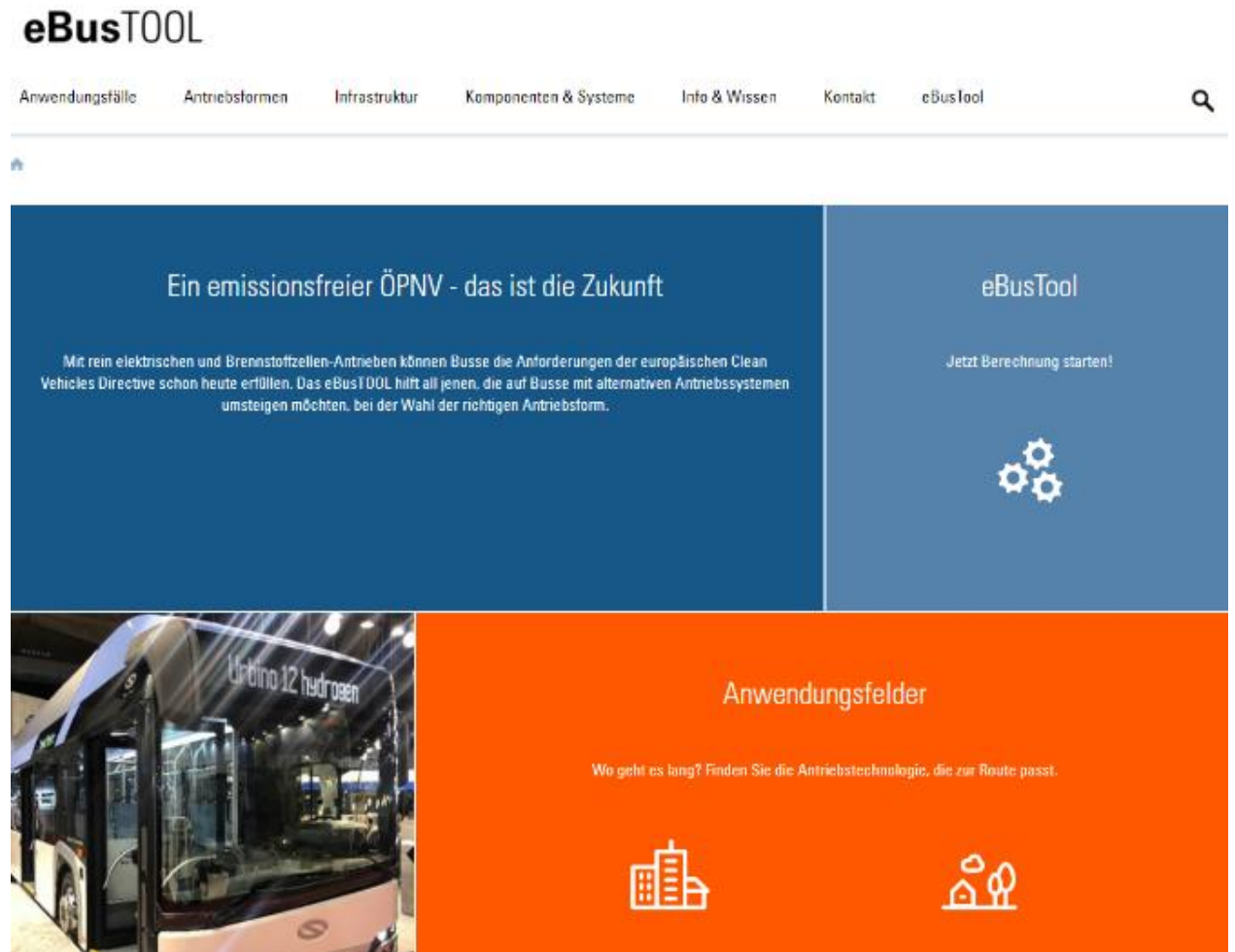


eBusTool 1

Vermittlung von Wissen – Informationen

■ Zielgruppen

- Verkehrsunternehmen mit „Erstkontakt“
- Politik, Gremien etc.
- Interessierte Öffentlichkeit



eBusTool 1

Vermittlung von Wissen – Informationen

■ Struktur

- Anwendungsfälle (Stadt- bzw. Regionalverkehr)
- Antriebsformen
 - Batteriebusse
 - Brennstoffzellenbusse
 - BSZ-Rangeextender-Busse
 - Obusse
 - Hybrid-Obusse
- Infrastruktur
- Komponenten und Systeme



Anwendungsfälle – Stadtverkehr vs. Regionalverkehr

Anwendungsfälle Antriebsformen Infrastruktur Komponenten & Systeme Info & Wissen Kontakt eBusTool

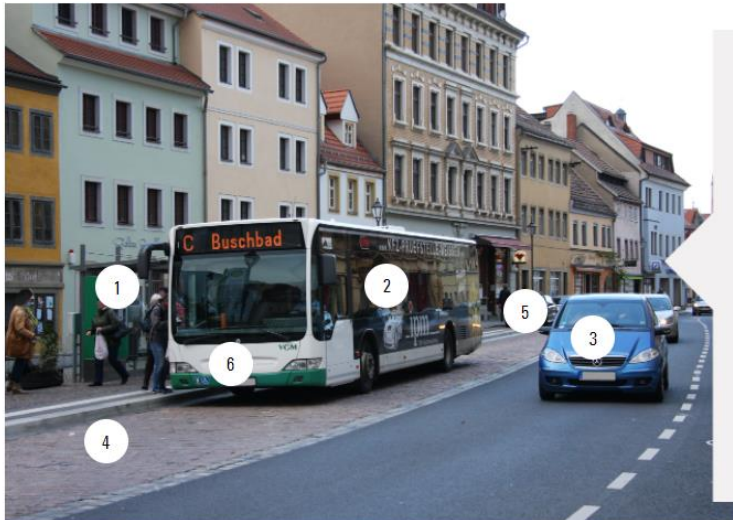


[🏠](#) / [Anwendungsfälle](#) / [Stadtverkehr](#)



Entscheidend für die Bedienbarkeit
von Linien oder ganzen Netzen im
Stadtverkehr

- Zuschchnitt von Umlaufplänen, insb. deren Gesamtfahrweiten
- Form der Pausengewährung (sog. Blockpausen bzw. Pausenregelungen nach §1 (3) Fahrpersonalverordnung)



- 1 Vergleichsweise kurze Haltestellen-Abstände und häufiges Öffnen und Schließen der Türen
- 2 Mittlere bis hohe Fahrgastzahlen
- 3 Häufige Beeinflussung durch andere Verkehrsteilnehmer
- 4 Mittlere bis niedrige Reisegeschwindigkeiten und häufige Verspätungen
- 5 Parallele Linienführungen und Bedienung einzelner Haltestellen durch mehrere Linien
- 6 Häufigere, dafür meist kurze Standzeiten an Endhaltestellen

- Heizungs- und Klimatisierungskonzept
- Keeling Regime
- Verfügbare Fläche in Betriebshöfen
- Unterschiedliche Endhaltestellen im Tages- bzw. Wochenverlauf
- Anzahl von Fahrzeugen pro Linie oder Linienbündel
- Die beschriebene Charakteristik des Stadtverkehrs führt dazu, dass je nach Stadtgröße und örtlichen Gegebenheiten verschiedene Antriebsformen und unterschiedliche Arten der Energiezuführung geeignet sein können.

Batteriebusse	Brennstoffzellenbusse	Oberleitungsbusse
Volllader	BSZ als Hauptenergiequelle	Konventionelle Oberleitungsbusse
Gelegenheitslader	BSZ als Range-Extender	Hybrid-Oberleitungsbusse
Pulslader		

Anwendungsfälle	Antriebsformen	Infrastruktur	Komponenten & Systeme	Info & Wissen
Stadtverkehr	Batteriebusse	Punktueller Ladung		
Regionalverkehr	Brennstoffzellenbusse	Wasserstoffbetankung		
	Oberleitungsbusse	Oberleitungen		

eBusTool 1

Beispiel für Antriebsformen – Batteriebusse

Batteriebusse

Batteriebusse



MAN Batteriebus (Quelle: Fraunhofer IVI)

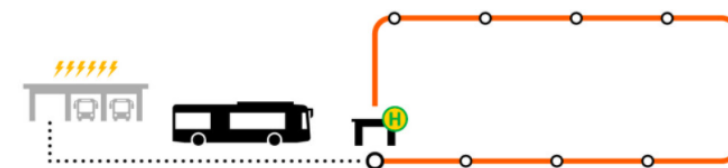
Kosten einschätzen

Beschaffungskosten für Batteriebusse	>
Wartungs- und Instandhaltungskosten	>
Werkstattausrüstung und Schulungen	>
Infrastrukturkosten	>

Arten von Batteriebussen

Volllader Gelegenheitslader Pulslder

Das Prinzip der Volllader beruht auf der ausschließlichen Nachladung der Batterien auf Betriebshöfen oder auf Abstellanlagen in laut Umlaufplan dort vorgesehenen Aufenthaltszeiten der Fahrzeuge. Nimmt man bestehende Betriebs- sowie Wartungs- und Instandhaltungsabläufe für Diesel- und Erdgasbusse zum Maßstab, wäre das Gros der Fahrzeuge ausschließlich über Nacht bzw. an Wochenenden oder Feiertagen nachzuladen. Davon unbenommen besteht die Möglichkeit, auch tagsüber Fahrzeuge nachzuladen, sofern hierfür planmäßige Aufenthaltszeiten auf Betriebshöfen oder Abstellanlagen bestehen.



Prinzip der Volllader, gezeigt an einer Ringlinie (Quelle: Fraunhofer IVI)

Technische Einschätzung

Wesentliche und ihre Einsatzmöglichkeiten unmittelbar beeinflussende Merkmale von Batteriebussen sind die speicherbare Energie des fahrzeugseitigen Energiespeichers (Batterie) sowie dessen zulässige Lade- und Entladeleistungen.

Batteriebusse unterscheiden sich nach den für sie geeigneten Ladestrategien in drei Kategorien:

- Volllader (Betriebshof-, Depot- oder Übernachtladung)
- Gelegenheitslader (Gelegenheitsladung bzw. Opportunity Charging)
- Pulslder (Pulsladung bzw. Flash-Charging oder Ultraschnellladung).

Ladestrategie beeinflussende Faktoren

- Konzept der Beheizung (rein elektrische Heizung vs. Hybridheizung) sowie der Klimatisierung (nur Fahrerklimaanlage vs. Δt -Klimatisierung vs. Vollklimatisierung)
- Zugschnitt der Umlaufpläne und hierbei insbesondere deren Gesamtfahrweiten
- Möglichkeit, sehr lange und kurze, i. d. R. Verkehrsspitzenzeiten bedienende Umlaufpläne so zu neuen Umlaufplänen zu kombinieren, dass
 - diese jeweils kürzer als die erzielbaren Reichweiten sind und
 - zwischen zwei Umlaufplänen ausreichend Zeit für das Wiederaufladen der Batterie gegeben ist.
- Form der Pausengewährung (sog. Blockpausen bzw. Pausenregelung nach §1 (3) Fahrpersonalverordnung)
- Möglichkeit, Ladeinfrastruktur außerhalb von Betriebshöfen und Abstellanlagen zu errichten.

Volllader bieten im Vergleich zu Gelegenheits- und Pulsladern im Rahmen ihrer Reichweite die größtmögliche Flexibilität und können sowohl im Stadt- als auch im Regionalverkehr eingesetzt werden, da nicht regelmäßige Ladestationen angefahren werden müssen. Umleitungen oder Straßensperrungen, die die Erreichbarkeit von Endhaltestellen mit Ladestationen verhindern würden oder deren Ausfall spielen daher keine Rolle. Ebenso wird der Einsatz von Vollladern weniger durch Verspätungen beeinflusst.

Hinzu kommt, dass ausschließlich Ladeinfrastruktur auf Betriebshöfen oder Abstellanlagen errichtet werden muss, was, sofern ausreichende Reserven im vorgelagerten Mittelspannungsnetz gegeben sind, einen deutlich geringeren Aufwand im Vergleich zu Gelegenheits- oder Pulsladern darstellt, für die außerhalb der Betriebshöfe Ladestationen errichtet werden müssen.

eBusTool 1

Beispiel – Ladeinfrastruktur

eBusTOOL

Anwendungsfälle Antriebsformen Infrastruktur Komponenten & Systeme Info & Wissen Kontakt eBusTool



🏠 / Infrastruktur / Punktuelle Ladung



Punktuelle Ladung

Punktuelle Ladung beschreibt die Nachladung fahrzeugseitiger Energiespeicher (i. d. R. Batterien) mithilfe eines Ladegerätes oder einer Ladestation, unabhängig davon, ob die Energieübertragung kontaktbasiert oder mittels elektromagnetischer Induktion erfolgt.

Die Begriffe Ladestation und –gerät sind nicht klar voneinander getrennt. Als Ladegeräte oder Ladesäulen werden zumeist Ladevorrichtungen mit einer Ladeleistung von bis zu 150 kW bezeichnet. Ladestationen stellen eine z. T. deutlich darüberhinausgehende Ladeleistung zur Verfügung und sind auch unter dem Begriff High Power Charging Systems (HPC) bekannt.

Anhand der Energieübertragungsform lassen sich drei weitere Unterscheidungen treffen:

- kontaktbasierte Energieübertragung mithilfe einer manuell herzustellenden Steckverbindung (CCS-Stecker inkl. fahrzeugseitigem Inlet bzw. Buchse)
- kontaktbasierte Energieübertragung mittels automatisiertem Kontaktsystem
- induktive Energieübertragung.

Für die Nachladung elektrisch angetriebener Linienbusse kommen gegenwärtig in Deutschland bis auf wenige Anwendungen ausschließlich kontaktbasierte Energieübertragungsformen zur Anwendung. Während Ladegeräte mit Steckverbindungen oder automatisierten Kontaktsystemen kombiniert werden können, werden höhere Ladeleistungen (200 kW oder mehr) i. d. R. nur mittels automatisierter Kontaktsysteme übertragen.

Steckverbindungen

Steckverbindungen bestehen aus der fahrzeugseitigen Buchse (auch Inlet genannt) und dem Stecker, bei dem es sich eigentlich um eine elektrische Kupplung handelt, da er im Gegensatz zu herkömmlichen Steckern auf der spannungsführenden Seite angebracht ist und deshalb keine offenliegenden Kontakte aufweist. Als Standard setzt sich zunehmend das Gleichstromladen mittels CCS-Inlet und CCS- bzw. Combo-2-Stecker durch.

Automatisierte Kontaktsysteme

Automatisierte Kontaktsysteme stellen mit oder ohne vorheriges manuelles Auslösen (z. B. über Betätigung eines Tasters) eine Verbindung mehrerer Kontakte ohne weitere Bedienhandlungen durch Fahrer oder Betriebspersonal her. Im Gegensatz zur Steckverbindung werden nur vier Kontakte geschlossen (Erdung – Plus – Minus – Control-Pilot), wobei für Plus und Minus jeweils auch mehr als ein Kontakt vorgesehen sein können. Die Kommunikation erfolgt leitungsgebunden über z. B. den CP-Kontakt bzw. ergänzend über eine Funkverbindung.

In Europa kommen derzeit im Wesentlichen drei automatisierte Kontaktsysteme zum Einsatz. Dabei handelt es sich um zwei Systeme, bei denen auf dem Fahrzeugdach ein Pantograph (Schunk Smart Charging) bzw. ein Ladearm (ABB TOSA) montiert ist und ein System, bei dem an einem Mastausleger ein sog. invertierter Pantograph (z. B. Stemman ChargingPANTO) angebracht wird. Alle drei Systeme haben Vor- und Nachteile, die individuell durch Verkehrsbetriebe und Kommunen gegeneinander abgewogen werden sollten. Die dabei wichtigsten Bewertungskriterien sind:

- Integrationsfähigkeit im öffentlichen Straßenraum inkl. Beachtung des freizuhaltenden Lichtraumes (i. d. R. 4,50 – 4,80 m)
- Integrationsfähigkeit in Abstellanlagen
- durch das System tolerierte Positionsabweichungen (Fahrt- und Querrichtung sowie Winkelabweichung von der Achse der straßenseitigen Komponenten)
- Gewicht und Bauraum auf dem Fahrzeug
- baulicher Aufwand für den Lademast.



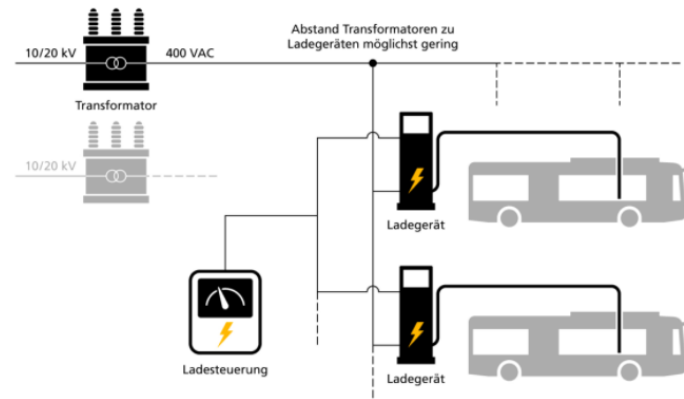
Stemman ChargingPANTO (links) – Schunk Smart Charging (rechts) (Quelle: Fraunhofer IVI)

eBusTool 1

Beispiel – Ladeinfrastruktur

Infrastruktur

Sofern keine ausreichend leistungsfähige Gleichstrominfrastruktur zur Verfügung steht, ist es notwendig, die Ladeinfrastruktur auf Betriebshöfen und i. d. R. auch Ladestationen außerhalb von Betriebshöfen über Mittelspannungstransformatoren an das Mittelspannungsnetz (i. d. R. 10 oder 20 kV) anzuschließen.



Schematischer Aufbau der Ladeinfrastruktur auf einem Betriebshof (Quelle: Fraunhofer IVI)

Über einen oder mehrere Mittelspannungstransformatoren wird die Mittelspannung in die für die Ladegeräte notwendige Eingangsspannung (i. d. R. 400 VAC 3 Phasen) umgewandelt und im Betriebshof oder der Abstellanlage mittels Leitungen verteilt. Dabei ist es wichtig, die Transformatoren möglichst in der Nähe der Ladegeräte zu platzieren, da so die elektrischen Leitungsverluste minimiert werden.

Die Leistung der Ladegeräte auf Betriebshöfen sowie die resultierende Gesamtanschlussleistung ist von verschiedenen Faktoren abhängig:

- Flottengröße und -zusammensetzung
- Fahrleistung an maßgebenden Verkehrstagen (i. d. R. Schultag)
- Einsatzzeiten der Fahrzeuge
- Ladestrategie (insb. Voll-lader vs. Gelegenheits-lader vs. Batteriebusse mit Wasserstoff-Range-Extender)
- Heizungskonzept (reine Elektroheizung vs. Hybridheizung)
- Klimatisierungskonzept (Vollklimatisierung vs. ΔT -Klimatisierung)



Kompletter Aufbau einer Ladestation mit Anschluss an das Niederspannungsnetz – Endhaltestelle Jena Westbahnhof (Quelle: Fraunhofer IVI)

Standardisierung und Kommunikation

Um die Interoperabilität zwischen elektrisch angetriebenen Bussen und der Ladeinfrastruktur sicherzustellen, existieren bereits verschiedene Standards, die sowohl technische Parameter als auch die Kommunikation betreffen. Wesentliche Festlegungen zu technischen Parametern finden sich in der IEC 61851-1, -23 und -23-1 (DC-Ladestation mit automatisiertem Kontaktsystem).

Die Kommunikation von Ladegeräten bzw. -stationen und den Fahrzeugen ist in den Normen

- IEC 61851-24 (Kommunikation Ladegerät – Fahrzeug)
- ISO/IEC 15118 (High-Level Kommunikation Ladegerät – Fahrzeug – DC-Ladung)

geregelt. Des Weiteren sind von Interesse die VDV-Schriften 260 und insb. 261, in der ergänzend zur ISO 15118 Regelungen zur Kommunikation mit einem sog. dispositiven Backend (Betriebshofmanagementsystem) festgelegt werden.

Die genannten Normen dienen dazu, die Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Ladeinfrastruktur zu vereinheitlichen um so Fahrzeuge unterschiedlicher Hersteller an einem Ladegerät bzw. einer Ladestation nachladen zu können.

eBusTool 1

Komponenten und Systeme

- Erläuterungen zu technischen Details
 - Grundverständnis der Technik
 - Auswirkungen des Energiebedarfs von Komponenten auf die Reichweite



Komponenten & Systeme

Auswahl verfeinern

☒ Alle Komponenten & Systeme

☐ Elektroantrieb

☐ Energiespeicher

☐ Nebenaggregate

☐ Wasserstoffantrieb

Batterien - Wasserstoffantrieb

 Wasserstoffantrieb

H2-Druckbehälter

 Wasserstoffantrieb

Luftpresser

 Nebenaggregate

Heizung und Klimatisierung

 Nebenaggregate

Rekuperation

 Elektroantrieb

Mehr laden

Brennstoffzellen

 Wasserstoffantrieb

Antriebsstrang - Wasserstoff

 Wasserstoffantrieb

Kühlkreisläufe

 Nebenaggregate

Spezifischer Energieverbrauch

 Elektroantrieb

Radnabenmotoren

 Elektroantrieb

Anwendungsfälle

Stadtverkehr

Regionalverkehr

Antriebsformen

Batteriebusse

Brennstoffzellenbusse

Oberleitungsbusse

Infrastruktur

Punktueller Ladung

Wasserstoffbetankung

Oberleitungen

Komponenten & Systeme

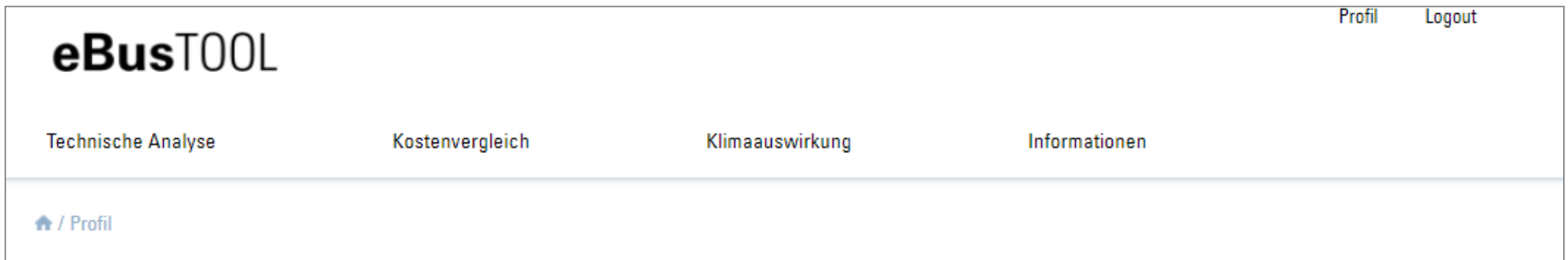
Info & Wissen

eBusTool 2

Analyse – Kosten – Klimaauswirkung

■ Inhalt

- Auf Verkehrsunternehmen zugeschnittene Analysen
- Batteriebusse (Volllader, Gelegenheitslader), Brennstoffzellenbusse
- Technische Machbarkeit inkl. Mehrbedarf (Fahrzeuge, Fahrpersonal, Leer-km)
- Kostenvergleich mit Dieselseinsatz
- Klimaauswirkung



eBusTool 2

Analyse – Kosten – Umweltwirkung

■ Zielgruppe

- Verkehrsunternehmen
- Unternehmensspezifische Eingangsdaten notwendig

■ Nutzerkonto (Profil)

- Klarnamen nicht notwendig
- Auflistung bereits vorgenommener technischer Analysen und Kostenvergleiche
- Vergleich von Betrachtungsfällen

■ vorbereitet auf gängige Fahrzeuglängen

- Midi-, Solo-, Gelenk- und Doppelgelenkbusse
- Dreiachser

eBusTOOL Profil Logout

Technische Analyse Kostenvergleich Klimaauswirkung Informationen

[Profil](#)

Übersicht

Bereits getätigte Berechnungen:

Volllader:

Erstellungsdatum	Name	Analyse	Vergleichen	Kostenvergleich	Klimaauswirkung	Löschen
Aug 31, 2021	Knote_VL_1		☐			
Sep 2, 2021	Knote_VL_2		☐			

Brennstoffzellenbusse:

Erstellungsdatum	Name	Analyse	Vergleichen	Kostenvergleich	Klimaauswirkung	Löschen
Aug 31, 2021	Knote_BZ_1		☐			
Sep 2, 2021	Knote_BZ_2		☐			
Sep 2, 2021	Knote_BZ_3		☐			
Sep 2, 2021	Knote_BZ_4		☐			
Sep 2, 2021	Knote_BZ_5		☐			

Vergleichen

Gelegenheitslader:

Erstellungsdatum	Name	Analyse	Vergleichen	Kostenvergleich	Klimaauswirkung	Löschen
Aug 31, 2021	Knote_GL_1		☐			

Vergleichen

eBusTool 2

Technische Analyse

■ Eingabedaten

- Technische Angaben
 - Höhenprofile
 - Heizung / Klimatisierung
- Reichweiten, spez. Energieverbräuche
 - je Fahrzeuglänge
 - in Grenzen frei wählbar
- Umlaufplanübersicht (Volllader, BZ-Busse)
- Umlaufpläne (Gelegenheitslader)
- Betriebliche Angaben
 - Verfügbarkeit von Kurzläufers für Substitutionen
 - ∅ Länge von Ein- und Aussetzfahrten inkl. Zeitbedarf

Betrachtungsfall erstellen

Name des Betrachtungsfalles: VL_1

Topographie:

☒ Eben bis leicht hügelig.

☐ Hügelig mit Höhenunterschieden von maximal 50 m

Heizung und Klimatisierung:

Reichweiten: ?

Umlaufpläne: ?

Verfügbarkeit von Kurzläufers: ?

☒ Ja

☐ Nein

☐ Teilweise

Ein- & Aussetzfahrten: ?

4

km

30

min

Formatvorgabe für Umlaufpläne:

Bitte laden Sie eine Übersicht über Ihre Umlaufpläne nach dem folgenden Schema als Textdatei (CSV) hoch! Bitte geben Sie für jeden zu betrachtenden Verkehrstag alle Umlaufpläne (max. 500) an und beachten Sie die untenstehenden Hinweise zur Formatierung! Sie können die Daten für einzelne Verkehrstage auch getrennt hochladen. Es wird empfohlen, die Daten mehrerer Betriebshöfe nur dann gemeinsam hochzuladen, wenn von diesen die zu betrachtenden Linien gemeinsam bedient werden. Ist dies nicht der Fall, so ist zu empfehlen, die Umlaufpläne der Betriebshöfe in getrennten Analysen betrachten zu lassen.

Folgendes Format muss beachtet werden:

Verkehrstag	Umlaufplannummer	Fahrzeugtyp	Start	Ende	Fahrleistung [km]
Text	Text	Text	hh:mm:ss oder hh:mm	hh:mm:ss oder hh:mm	Dezimalzahl

Beispiel:

1	81041	SL	04:05	20:34:00	231,814
1	81042	SL	05:05	20:00:00	239,276
1	81043	SL	04:12	21:04:00	256,687
...	...	...	...	...	...

Innerhalb der CSV-Datei:

1;81041;SL;04:05;20:34:00;231,814

1;81042;SL;05:05;20:00:00;239,276

eBusTool 2

Technische Analyse

■ Ergebnisse

- Übersicht Dieseldieselbetrieb
 - Fahrzeuganzahl
 - Gesamtfahrleistung pro Tag
 - Fahrpersonalstunden
- Übersicht Voll- / Gelegenheitslader / BZ-Busse
 - Fahrzeuganzahl inkl. zus. Fahr-zeuge
 - Gesamtfahrleistung pro Tag inkl. zus. Leer-km
 - Fahrpersonalstunden inkl. Zusatz-bedarf
 - Anzahl Ladestationen (Gelegenheitslader)

Hinweis

Auswertung

Ergebnisse

Das Programm ermittelt anhand von Umlaufplandaten den Mehraufwand (Fahrzeuge, Leerkilometer und Fahrpersonalstunden) beim Einsatz von Voll- und Brennstoffzellenbussen. Hierbei handelt es sich um ein überschlägliches Verfahren, bei dem nicht alle Spezifika eines Verkehrsunternehmens berücksichtigt werden können. Das Verfahren beruht auf einer Adaption von Umlaufplänen, um

- technisch mögliche Reichweiten zu berücksichtigen und
- ggf. Zwischenlademöglichkeiten zu gewähren.

Aus diesem Grund wird empfohlen, Betrachtungsfälle zu definieren, in denen ausschließlich Umlaufpläne, die von einem Betriebshof aus bedient werden, analysiert werden. Wird die überwiegende Zahl der im Betrachtungsfall enthaltenen Linien von mehreren Betriebshöfen aus bedient, so können diese Betriebshöfe in einem Betrachtungsfall zusammengefasst werden.

Als PDF herunterladen

VL_1

Verkehrstag: WT

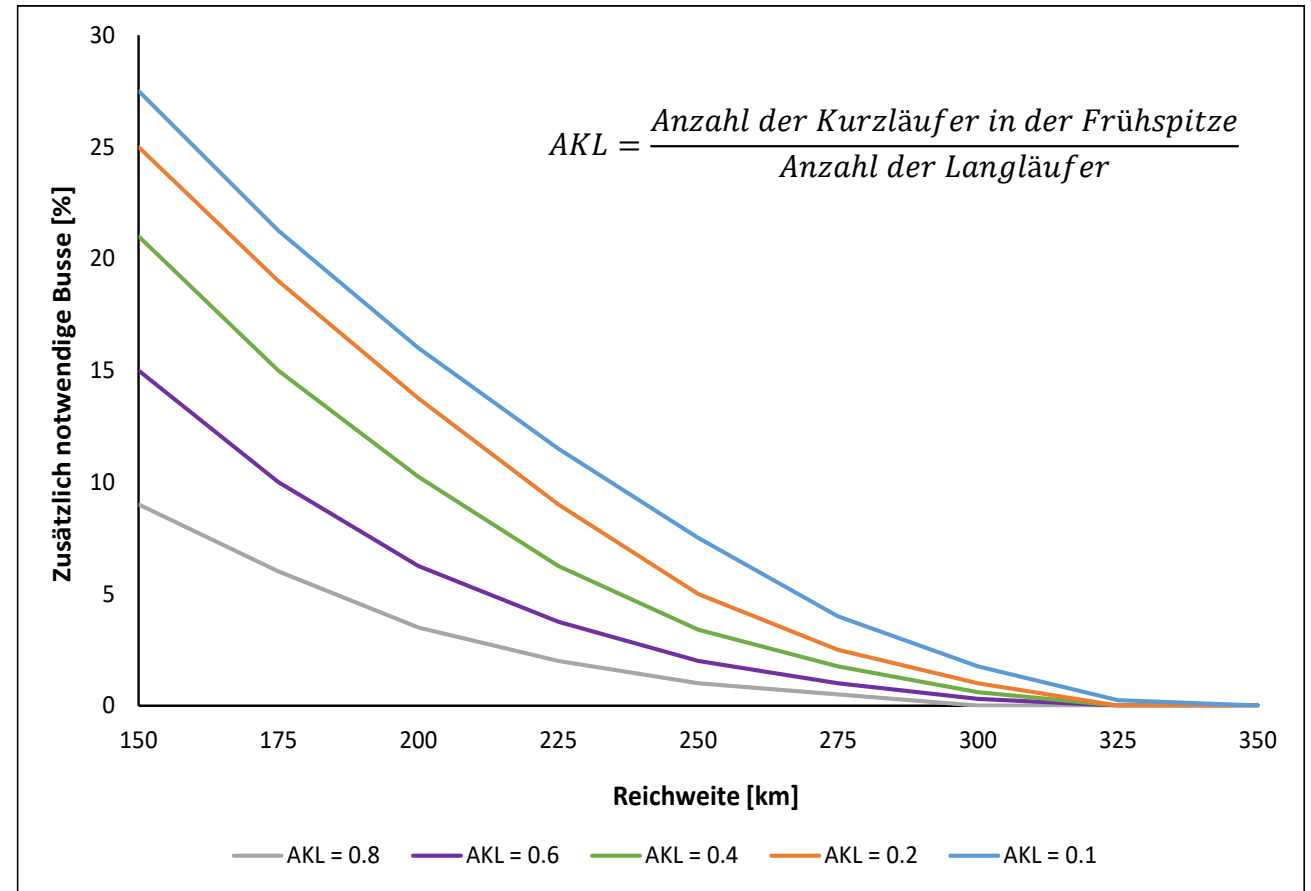
	Gelenkbus	Solobus
Anzahl der Busse bei Einsatz von Verbrennungsmotor	43	6
Anzahl zusätzlicher Fahrzeuge bei Batteriebusseinsatz (Voll- / Gelegenheitslader)	0	0
Gesamtfahrleistung bei Einsatz von Verbrennungsmotor	8633.96km	485.62km
Zusätzliche Leerlaufkilometer	165km	0km
Relativer zusätzlicher Aufwand an Leerkilometern bezogen auf Gesamtfahrleistung	1.91%	0%
Gesamtpersonaleinsatz	609:45:00	32:22:00
Zusätzliche Fahrpersonalstunden	20:00:00	00:00:00
Relativer zusätzlicher Aufwand an Fahrpersonalstunden	3.28%	0%

eBusTool 2

Technische Analyse – Beispiel Fahrzeugmehrbedarf bei Vollladern

■ Vorgehensweise

- Analytische Betrachtung aller Umlaufpläne
- Kombination von Kurzläufers
- Ermittlung von Umlaufplänen mit „Kürzungs- bzw. Zwischenladungsbedarf“
- Ermittlung von freien Kapazitäten für Kürzungen oder Zwischenladungen
 - durch Kurzläufer
 - durch ausreichend kurze bzw. früh endende Langläufer
- Ermittlung von Zusatzbedarf
 - 1 Zusatzfahrzeug pro 3 - 4 Umlaufpläne > Reichweite
 - Leer-km, Fahrpersonalstunden



eBusTool 2

Kosten

■ Vorgehensweise

- Kostenvergleich mit Dieselmussen
- €/Fz-km
 - Rückrechnung von Jahresgesamtkosten mittels Gesamtjahresfahrleistung
- Kostenkategorien
 - Investitionskosten (jährliche Kapitalkosten) für Busse und Infrastruktur
 - Diesel- / Heizöl- / AdBlue- / Energie- / H₂-Kosten
 - Fahrpersonalkosten
 - W&I-Kosten für Fahrzeuge und Infrastruktur
- Kein Overhead, keine Schulungskosten, keine großen Neubauten

eBusTool 2

Kosten – Eingabedaten

Kategorien

- Allgemeine Angaben
 - z. B. kalkulatorischer Zinssatz
- Grundlagen für Dieselbusbetrieb
- Angaben zu alternativer Antriebsform

Alle Daten vorbelegt

- Basierend auf Erfahrungen aus durchgeführten Machbarkeitsstudien und allgemein zugänglichen Informationen
- Mittelwerte
- Änderungen in vorgegebenen Grenzen möglich

Für die Kostenberechnungen werden folgende Beschaffungskosten für Batteriebusse und Ersatzbatterien (1 Tausch während Betrachtungszeitraum) verwendet, die Sie ändern können:

Beschaffungskosten - Volllander:	Midibus	450000	€
	Solobus	550000	€
	Dreiaxser	600000	€
	Gelenkbus	720000	€
	Doppelgelenkbus ⓘ	850000	€

Batteriekosten - Volllander:	Midibus	140000	€
	Solobus	150000	€
	Dreiaxser	180000	€
	Gelenkbus	200000	€
	Doppelgelenkbus ⓘ	220000	€

Nutzungsdauer Batteriebus	14	Jahre
Abschreibungsdauer Batteriebus	10	Jahre

Es wird empfohlen, für die Batteriebusse die gleiche Abschreibungs- und Nutzungsdauer wie für Dieselbusse zu verwenden. Wenn Sie dies nicht wünschen, können Sie die Zeiten ändern.

Für die Kostenberechnungen werden nachfolgend Beschaffungskosten für die Ladeinfrastruktur im Betriebshof verwendet, die Sie ändern können:

Ladegerät (ca. 100 kW) für Volllander:	50000	€
Ladegerät (ca. 150 kW) für Volllander:	60000	€

Pro zu installierendem Ladegerät werden pauschal Kosten für die Installation sowie die vorgelagerte Infrastruktur eingerechnet. Die Werte beruhen auf realen Umsetzungsprojekten und berücksichtigen typische Umbaumaßnahmen wie Kabelverlegung, einfache Überdachungen, Überkopf-Kabelzuführungen. Größere Neubauten, wie z. B. Busports- oder Abstellhallen sind nicht mit enthalten.

Baukostenzuschuss:	60	€/kW
Kosten Netzanschluss Betriebshof:	2000	€/Ladegerät
Kosten Transformatoren Betriebshof:	5500	€/Ladegerät
Kosten Kabelverlegung etc. im Betriebshof:	1750	€/Ladegerät
Planungs- und Verwaltungskosten:	2500	€/Ladegerät

eBusTool 2

Klimaauswirkung

■ Vorgehensweise

- Jahresgesamtemissionen
 - CO₂
- Basierend auf Emissionen pro
 - Liter Diesel
 - kWh Elektroenergie
 - kg H₂
- inkl. Vorkette

eBusTool 1

Beispiel für Antriebsformen – Brennstoffzellenbusse

Brennstoffzellenbusse

Brennstoffzellenbusse



Wasserstofftankstelle (Quelle: GP JOULE)

Technische Einschätzung

Wasserstoffbetriebene Brennstoffzellenbusse verfügen – ebenso wie batterieelektrische Busse – über einen Elektromotor, der das Fahrzeug antreibt. Die dafür notwendige Elektroenergie wird in einer Brennstoffzelle (BSZ) an Bord des Fahrzeugs erzeugt. Dies geschieht durch eine chemische Reaktion, bei der Wasserstoff (aus den Speichertanks im Fahrzeug) und Sauerstoff (aus der Umgebungsluft) zu Wasser umgewandelt werden. Die dabei entstehende Elektroenergie wird entweder in einer Batterie zwischengespeichert oder direkt an die Elektromotoren und etwaige Nebenverbraucher (z. B. Wärmepumpen zur Klimatisierung des Fahrzeugs) weitergegeben.

Die beiden hier betrachteten Antriebsformen unterscheiden sich im Wesentlichen dadurch, welcher fahrzeugseitige Energiespeicher die Hauptenergiequelle darstellt:

- Fahrzeuge, bei denen der Hauptenergieanteil aus der BSZ (und damit aus dem Wasserstoff) kommt sind auch unter der Bezeichnung „BSZ-Hybrid“ bekannt. Die an Bord befindliche Batterie dient in erster Linie zur Zwischenspeicherung der erzeugten Energie aus der BSZ bzw. zur Bereitstellung hoher elektrischer Leistungen oder zur Aufnahme von Rekuperationsenergie beim Bremsen.
- BSZ-REX-Fahrzeuge sind Fahrzeuge, die über eine relativ große Batterie verfügen, die über eine externe Schnittstelle aufgeladen werden kann (z. B. über einen Ladestecker). Zur Erhöhung der Reichweite sind des Weiteren ein Wasserstofftank und eine BSZ auf dem Fahrzeug verbaut. Die BSZ fungiert dabei als Range-Extender (Reichweitenverlängerer, daher die Bezeichnung „REX“) während der Hauptenergieanteil aus der Hochvoltbatterie kommt.

Kosten einschätzen

Beschaffungskosten für Brennstoffzellenbusse

Wartungs- und Instandhaltungskosten

Sicherheit

Werkstattausrüstung und Schulungen

Infrastrukturkosten

Arten von Brennstoffzellenbussen

BSZ als Hauptenergiequelle

BSZ als Range-Extender

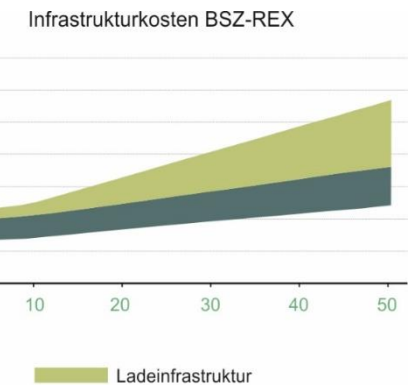
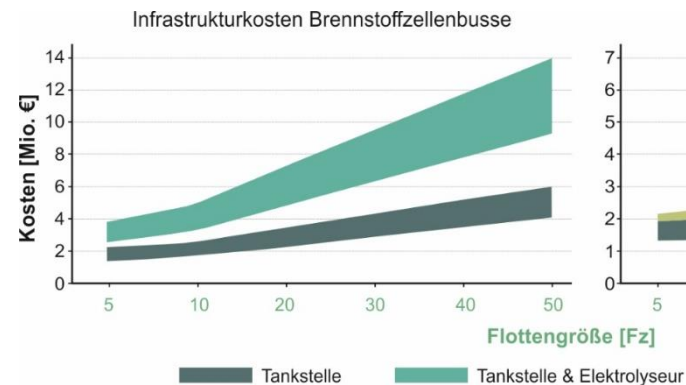
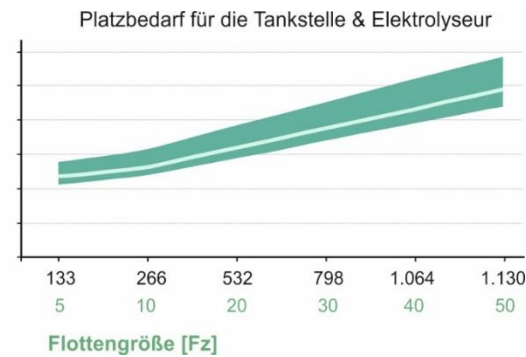
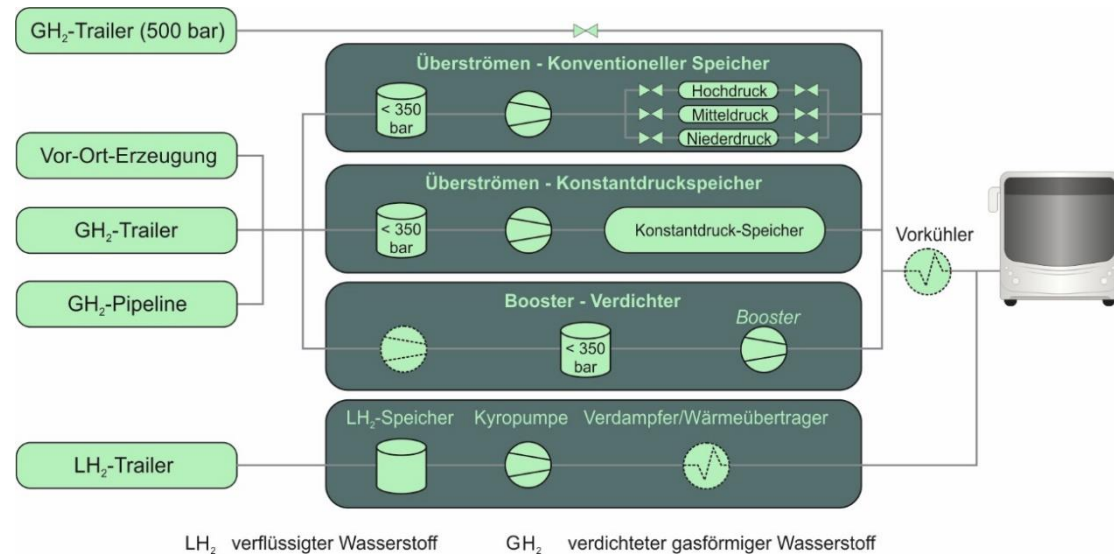
Der reine Brennstoffzellenbus besitzt eine relativ kleine Batterie (üblicherweise < 40 kWh), deren Aufgabe es ist, in der BSZ erzeugte Energie zwischen zu speichern und bei Bedarf zusätzliche Leistung für den Antriebsstrang bereitzustellen. Weiterhin nimmt sie auch die beim Bremsen durch Rekuperation gewonnene Energie auf. Die Hauptenergiequelle stellt jedoch eine leistungsfähige BSZ (und damit der Wasserstoff) dar. Für einen 12 m-BSZ-Hybrid-Bus liegt die BSZ-Leistung typischerweise zwischen 80 und 85 kW. Bei BSZ-Gelenkbussen werden üblicherweise etwas größere Batterie- und Tankgrößen verwendet, um dem höheren Energiebedarf Rechnung zu tragen.



Beispiel für einen Brennstoffzellenbus (Quelle: WSW Wuppertaler Stadtwerke GmbH)

eBusTool 1

Beispiel für Infrastruktur – H₂-Erzeugung und Betankung



eBusTool 2

Anspruch

- Nicht alle Unternehmensspezifika abbildbar
 - trotz etwa 650 Variablen und Hilfsrechengrößen
- Berechnungsergebnisse geben Hinweise
- eBusTool 2 ersetzt nicht eine detaillierte Einführungskonzeption
- Haftungsausschluss



DRESDEN

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Prof. Dr.-Ing. Thoralf Knotz

Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und
Infrastruktursysteme IVI

Zeunerstraße 38, 01069 Dresden

www.ivi.fraunhofer.de

Sven-Erik Kratz

SEK Strategy Consulting GmbH

Kurfürstendamm 11, 10179 Berlin

www.sek-consulting.de