

Informationen zur Clean Vehicles Directive (Richtlinie (EU) 2019/1161)

Umsetzung im Bereich ÖPNV

03/2022



Quelle: Esa Niemelä Pixabay

Gefördert durch:



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR VERKEHR

Unterstützt durch



Landesagentur für neue Mobilitätslösungen
und Automotive Baden-Württemberg

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Die Clean Vehicles Directive	2
2.1	Quoten der Clean Vehicles Directive	2
2.2	Anwendungsbereich der Clean Vehicles Directive	4
2.3	Ausnahmen der Clean Vehicles Directive	4
3	Fahrzeugtechnologieüberblick	6
3.1	Elektrobusse	6
3.2	Wasserstoffbusse	8
3.3	Oberleitungsbusse	9
4	Handlungsfelder für Kommunen	10
4.1	Vergabeverfahren	10
4.2	Unterstützende Rahmenbedingungen durch die ÖPNV-Aufgabenträger	11
4.3	Einführung alternativer Antriebstechnologien im ÖPNV: Umsetzungsprozess	12
5	Handlungsfelder für Verkehrsbetriebe	14
5.1	Energieversorgungskonzepte	14
5.2	Aufbau der notwendigen Infrastruktur	17
5.3	Beschaffung	24
5.3.1	Marktentwicklung in Baden- Württemberg	24
5.3.2	Marktübersicht Fahrzeuge und Infrastruktur	25
5.3.3	Auswahl an Dienstleistern für Retrofitting	27
5.3.4	ÖPNV-Beratungsunternehmen (förderfähig mit E-Bus-Beratungsgutschein) ...	27
5.4	Förderprogramme	28
5.5	Busprojekte mit emissionsfreien Antrieben in Baden-Württemberg	29
6	Literaturverzeichnis	34

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: BEV Funktionsschema.....	6
Abbildung 2: Funktionsschema BEV + BZ.....	7
Abbildung 3: Funktionsschema BZ- Fahrzeug.....	8
Abbildung 4: Funktionsschema H2- Verbrenner.....	8
Abbildung 5: Funktionsschema Oberleitungsbus	9
Abbildung 6: Funktionsschema Depotladen	14
Abbildung 7: Funktionsschema Gelegenheitsladen.....	15
Abbildung 8: Funktionsschema Laden per Oberleitung.....	16
Abbildung 9: Funktionsschema Wasserstoffbetankung	16
Abbildung 11: Genehmigungsverfahren Wasserstoffinfrastruktur	22
Abbildung 12: Platzbedarf Werkstattumbau für emissionsfreie Busse	23
Abbildung 13: Marktentwicklung von Bussen in BW nach Antriebstechnologie.....	24
Abbildung 14: Marktübersicht Innovative Antriebe und Fahrzeuge	26
Abbildung 15: Geförderte Bus-Projekte in Baden-Württemberg	29

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beschaffungsquoten der CVD, (EU-Richtlinie 2019/1161)	3
Tabelle 2: Kostenüberblick Busse mit alternativen Antrieben.....	25
Tabelle 3: Busse mit alternativen Antrieben der drei Marktführer in Deutschland	26
Tabelle 4: Auswahl an Dienstleistern für Retrofitting.....	27
Tabelle 5: ÖPNV-Beratungsunternehmen	27
Tabelle 6: Übersicht Förderprogramme für emissionsfreie Busse	28

Abkürzungsverzeichnis

AC	Alternating Current; Wechselstrom
BetrSichV	Betriebssicherheitsverordnung
BEV	Battery Electric Vehicle
BImSchG	Bundesimmissionsschutzgesetz
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BMVI	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
BZ	Brennstoffzellenfahrzeug
CNG	Compressed Natural Gas
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CVD	Clean Vehicles Directive
DC	Direct Current; Gleichstrom
EU	Europäische Union
H ₂	Wasserstoff
HV-Batterie	Hochvoltbatterie
k. A.	keine Angabe(n)
Kap.	Kapitel
kg	Kilogramm
km	Kilometer
kV	Kilovolt
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
LBO	Landesbauordnung
LGvFG	Landesgemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz
LIS	Ladeinfrastruktur
LNG	Liquefied Natural Gas
LKW	Lastkraftwagen
m	Meter
m ²	Quadratmeter
Mio.	Millionen
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MVA	Megavoltampere
NOW	Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellen-technologie
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PKW	Personenkraftwagen
s.	Siehe
SaubFahrzeugBeschG	Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetz
SektVO	Sektorenverordnung
TAB	Technische Anschlussbedingungen
u. U.	unter Umständen
VDV	Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V.
Vgl.	Vergleich
z.B.	zum Beispiel
zzgl.	Zuzüglich

1 Einleitung

Der Klimawandel ist ein allgegenwärtiges Thema, sowohl weltweit als auch in Europa und nicht zuletzt hier in Deutschland. Dabei ist das langfristige Ziel, bis zum Jahr 2045 über alle Sektoren hinweg Treibhausgasneutralität zu erreichen (vgl. Klimaschutzgesetz der Bundesregierung). Entsprechend dieser Zielsetzung sind in den letzten Jahren die Emissionen in den meisten Sektoren kontinuierlich zurückgegangen. Anders sieht es im Verkehrssektor aus, dem drittgrößten Verursacher von Treibhausgasemissionen in Deutschland. Hier kam es in den letzten 20 Jahren zu einer Stagnation der Emissionsmenge, sodass es ohne eine schnelle Reduzierung nur schwer möglich sein wird, die Klimaziele der Bundesregierung einzuhalten (vgl. Webseite Umweltbundesamt (UBA), Klimaschutz im Verkehr, 2021). Zwar hatte die Corona Pandemie durch Home-Office und Lockdown zu einem Rückgang der verkehrsbedingten Emissionen geführt, diese werden jedoch bei einer Rückkehr der Mitarbeitenden in die Büros und Unternehmen in Baden-Württemberg sehr wahrscheinlich wieder steigen.

Die Emissionen aus dem motorisierten Individualverkehr (MIV) stellen dabei nur einen Teil des Problems dar, weitere Emissionen stammen auch aus dem Transport- und Logistiksektor, sowie aus dem mit fossilen Brennstoffen betriebenen öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV). Damit es zu einem Umstieg auf einen nachhaltigen Verkehr kommt, hat die Europäische Union die Clean Vehicles Directive („Saubere-Fahrzeuge-Richtlinie“) verabschiedet, die zum ersten Mal verbindliche Quoten für die Beschaffung emissionsfreier Fahrzeuge bei Aufträgen der öffentlichen Hand festlegt. Am 2. August 2021 ist die Richtlinie, bzw. deren Umsetzung in nationales Recht, in Kraft getreten.

Ziel der Richtlinie ist es, den Markt für saubere und emissionsfreie Fahrzeuge durch die öffentlichen Beauftragungen zu fördern, was zu einer langfristigen Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit in diesem Segment führen soll. Die Richtlinie umfasst dabei neben den Beschaffungsquoten für leichte und schwere Nutzfahrzeuge der Klassen M1 und N1 bis N3 auch Beschaffungsquoten für Busse der Klasse M2 und M3.

In einem zweiten Schritt werden zum 01. Januar 2026 die zu erfüllenden Quoten noch einmal deutlich verschärft, mit dem Ziel die Schadstoff- und Treibhausgasemissionen weiter zu reduzieren. Von der CVD betroffen ist der ÖPNV, beziehungsweise alle Verkehrsunternehmen, die Personenbeförderungsleistungen im ÖPNV erbringen.

eine Vielzahl von technischen und betrieblichen Herausforderungen sind zu überwinden, um das Potenzial von „emissionsfreien“ Fahrzeugen, d. h. batterieelektrischen bzw. Wasserstofffahrzeugen, erschließen zu können. Unter anderem muss die Infrastruktur zur Versorgung der Fahrzeuge mit der notwendigen Energie (Strom oder Wasserstoff) vor Ort installiert und die Betriebsabläufe zumindest teilweise angepasst werden (vgl. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV), S.8 f; 2020).

Hierzu werden in dem hier vorliegenden Leitfaden die verschiedenen auf dem Markt erhältlichen Fahrzeugkonzepte sowie die zum Betrieb notwendige Infrastruktur näher beleuchtet. Des Weiteren werden betriebliche Aspekte, wie die erforderlichen Anpassungen von Betriebshöfen, sowie grobe Kostenparameter umrissen.

2 Die Clean Vehicles Directive

Mit dem Inkrafttreten des ersten Referenzzeitraums der CVD am 02.08.2021 und der damit einhergehenden Beschaffungsquoten möchte die EU-Kommission die Emissionen des Transportsektors nachhaltig reduzieren. Dazu wurden rechtlich verbindliche Fahrzeug-Beschaffungsquoten für die öffentliche Auftragsvergabe festgelegt. Dabei wurde auf die unterschiedlichen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen der einzelnen EU-Länder Rücksicht genommen. Daher wurden die einzelnen Quoten für saubere bzw. emissionsfreie Fahrzeuge auf Basis des jeweiligen Bruttoinlandsprodukts ermittelt (vgl. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV), S.8 ff; 2020).

Die Richtlinie (EU) 2019/1161 vom 20. Juni 2019 wurde entsprechend im Amtsblatt der EU (L 188/116) am 12.07.2019 veröffentlicht. Grundlage für die Neufassung war die 2009 bereits veröffentlichte Richtlinie 2009/33/EG. Die Umsetzung in nationales Recht musste innerhalb von 24 Monaten erfolgen. In Deutschland ist das mit dem Inkrafttreten des Gesetzes über die Beschaffung sauberer Straßenfahrzeuge (Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetz) am 15. Juni 2021 geschehen. Das Bundesgesetz stellt eine 1:1-Umsetzung der EU-Richtlinie dar und verpflichtet die Bundesländer, die Einhaltung der Mindestziele in ihrem Zuständigkeitsbereich zu überwachen und zu gewährleisten (§ 5 Abs. 2, § 7 Abs. 1 SaubFahrzeugBeschG). Konkrete Regelungen dazu, wie dies erfolgen soll, hat der Bund jedoch nicht getroffen. Zur Schließung dieser Lücke ist ein Landesgesetz erforderlich, da nicht nur die Landesverwaltung, sondern zum Beispiel auch öffentliche Unternehmen in Privatrechtsform überwacht werden müssen. Ein solcher Gesetzgebungsprozess kann bis zu einem Jahr dauern.

2.1 Quoten der Clean Vehicles Directive

Die Beschaffungsquoten der CVD sind das “Kernstück” des Gesetzes und gelten sowohl für PKWs und leichte Nutzfahrzeuge der Klassen M1, M2 und N1, als auch für schwere Nutzfahrzeuge wie LKWs und Busse der Klassen M3, N2 und N3. Unterschieden wird hingegen bei den Mindestzielen. Für die Klassen M1, M2 und N1 erfolgt die Bemessung anhand von Emissionsgrenzwerten. Für den Bereich LKW und Busse, also Fahrzeuge der Klassen M3, N2 und N3, erfolgt die Bemessung anhand der Nutzung alternativer Kraftstoffe und Antriebe (vgl. Dr. Obladen, 2021). Aufgrund dieser Unterscheidung gelten unterschiedliche Mindestziele, entsprechend der zwei Referenzzeiträume wie in Tabelle 1 aufgeführt.

Die Erfüllung der Mindestziele kann innerhalb der vorgegebenen Referenzzeiträume von 2021 bis 2025 sowie von 2026 bis 2030 zeitlich flexibel gestaltet werden. Dies gilt für die Beschaffung, Kauf, Leasing und auch für Dienstleistungsaufträge. Das bedeutet, dass erst am Ende eines Referenzzeitraumes festgestellt werden kann, ob die Mindestziele erreicht wurden – nach Betrachtung aller Neubeschaffungen bzw. Dienstleistungsverträge innerhalb des jeweiligen Zeitraums. Im ersten Referenzzeitraum von August 2021 bis Ende 2025, sowie im zweiten Referenzzeitraum bis Ende 2030 gelten für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge die gleichen Beschaffungsquoten in Höhe von 38,5 Prozent. Die jeweils geltenden Grenzwerte zu CO₂- und Luftschadstoffemissionen gemäß CVD (siehe Tabelle 1) müssen für eine Anrechnung der CVD-Mindestziele für Neubeschaffungsquoten eingehalten werden.

Die Beschaffungsquote für schwere Nutzfahrzeuge liegt in den zwei Bezugszeiträumen bis Ende 2025 bei 10 Prozent und ab Anfang 2026 bei 15 Prozent. Hier erfolgt die Bemessung jedoch anhand der Nutzung alternativer Kraftstoffe und Antriebe.

Da der Fokus auf dem Bereich Busse und dem ÖPNV liegen soll, wird auf PKWs, leichte Nutzfahrzeuge und LKWs im Folgenden nicht näher eingegangen.

Fahrzeugklasse	Vorgaben „sauberes Fahrzeug“		Beschaffungsquote 1. Referenzzeitraum 02.08.21-31.12.25	Beschaffungsquote 2. Referenzzeitraum 01.01.26-31.12.30
PKW	50 g CO ₂ / km, 80 % Luftschadstoffe (% der Emissionsgrenzwerte); Keine Plug-In-Hybride	Ab 2026: 0 g CO ₂ / km, k.A. zu den Luftschadstoffemissionen	38,5 %	
Leichte Nfz (< 3,5t)	50 g CO ₂ / km, 80 % Luftschadstoffe (% der Emissionsgrenzwerte); Keine Plug-In-Hybride		38,5 %	
LKW (> 3,5t)	Nutzung alternativer Kraftstoffe (lt. Art. 2 AFID Bsp. Strom, Wasserstoff, Erdgas, synthetische Kraftstoffe ² und Biokraftstoffe ²)		10 %	15 %
Busse (> 5t)			45 % ¹	65 % ¹

Tabelle 1: Beschaffungsquoten der CVD, (EU-Richtlinie 2019/1161)

Abbildungsvorlage: Webseite Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV), 2021; ¹ Die Hälfte der beschafften Busse muss emissionsfrei sein (< 1 g CO₂/km Ausstoß). ² Alternative Kraftstoffe dürfen nicht mit fossilen Kraftstoffen gemischt werden.

Die Beschaffungsquoten für saubere bzw. emissionsfreie Busse im ÖPNV beginnen mit 45 Prozent und steigen dann entsprechend ab dem 01.01.2026 auf 65 Prozent an. Zusätzlich wurden von der europäischen Union sogenannte Mindestziele definiert, die eingehalten werden müssen. Dieses Mindestziel besagt, dass von der bis Ende 2025 zu erfüllenden Beschaffungsquote von „sauberen“ Bussen (45 Prozent) wiederum die Hälfte von „emissionsfreien“ Bussen erbracht werden muss. Entsprechend dieser Vorgabe muss im ersten Referenzzeitraum ein Anteil von 22,5 Prozent erreicht werden. Im zweiten Referenzzeitraum ab 2026 steigt der Anteil dann auf 32,5 Prozent (vgl. Webseite Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV), 2021).

Nachdem im oberen Teil dieses Abschnitts über saubere bzw. emissionsfreie Busse gesprochen wurde, sollen im Folgenden die entsprechenden Merkmale für die Einordnung der Busse näher betrachtet werden. Ein Bus gilt als „sauberes Fahrzeug“, wenn er mit alternativen Kraftstoffen betrieben wird. Unter dem Begriff „alternative Kraftstoffe“ sind Energiequellen zu verstehen, die teilweise als äquivalent zu erdölbasierten Kraftstoffen für den Verkehrssektor verwendet werden können. Ebenfalls müssen sie zur Verringerung der CO₂-Emissionen beitragen, sowie die Umweltverträglichkeit erhöhen. Zu den alternativen Kraftstoffen zählen unter anderem: Biokraftstoffe gemäß der Richtlinie 2009/28/EG, synthetische sowie paraffinhaltige Kraftstoffe, Erdgas in Form von LNG und CNG, sowie Biomethan und Flüssiggas. Nicht zulässig ist eine Vermischung flüssiger Biokraftstoffe, synthetischer und paraffinhaltiger Kraftstoffe mit konventionellen fossilen Kraftstoffen. Die Nutzung flüssiger Biokraftstoffe ist nur in ihrer reinen Form zulässig (vgl. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV), S.9 f; 2020).

Eine Sonderregelung gilt für Plug-in-Hybridbusse, die zusätzlich zum Strom noch mit fossilen Kraftstoffen betrieben werden. Sie gelten auch als „sauberes Fahrzeug“. Dennoch liegt der langfristige und umweltpolitische Fokus der CVD auf „emissionsfreien“ Bussen, daher wird auf die genannten Biokraftstoffe für saubere Fahrzeuge, sowie die Nutzung von Plug-in-Hybridbussen im Rahmen dieses Dokuments nicht weiter eingegangen.

Damit ein Bus als „emissionsfreies Fahrzeug“ gilt, ergeben sich aus der CVD aktuell nur zwei darstellbare Möglichkeiten: der batterieelektrische Bus bzw. Oberleitungsbus oder der Brennstoffzellenbus.

2.2 Anwendungsbereich der Clean Vehicles Directive

Die in Abschnitt 2.1 beschriebenen Beschaffungsquoten gelten ab dem 02. August 2021 in folgenden Bereichen, jedoch nur wenn sie oberhalb des Schwellenwerts zur Anwendung des EU-Vergaberechts liegen:

- Die Quoten gelten für alle im öffentlichen Raum handelnden Auftraggeber wie Städte, Kreise, Gemeinden usw.
- Neben den öffentlichen Auftraggebern zählen dazu auch Sektorenauftraggeber, die im öffentlichen Raum handeln, d.h. Auftraggeber, die Tätigkeiten wahrnehmen im Bereich: Energie- und Wasserversorgung oder Post- und Paketdienste
- Bei der Fahrzeugbeschaffung sowie öffentlichen Vergabeverfahren, bei denen der Auftraggeber die Fahrzeuge beschafft (mittels Kaufs, Leasing, Anmietung oder Ratkauf)
- Bei der Vergabe öffentlicher Dienstleistungsaufträge zur Erbringung von Personenverkehrsdienstleistungen auf der Straße sowie bei Dienstleistungsaufträgen mittels eines Verkehrsdienstes im Bereich des Öffentlichen Verkehrs und der Personensorb beförderung

Das Bundesverkehrsministerium hat diverse Förderprogramme geschaffen, um die Verkehrsunternehmen bei der Umstellung ihres Fuhrparks auf emissionsfreie Fahrzeuge zu entlasten. Zusätzlich soll dadurch Preissteigerungen bei den ÖPNV-Tickets und Angebotsreduzierungen entgegengewirkt werden. Die finale Ausgestaltung der CVD im Landesrecht, sowie die damit einhergehenden Kontrollmechanismen der Quoten bleiben abzuwarten. Dennoch sollten alle betroffenen Akteure und Kommunen versuchen, in der Zwischenzeit konstruktiv an einer Umsetzung zu arbeiten (vgl. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV), S.10; 2020).

2.3 Ausnahmen der Clean Vehicles Directive

Von den Beschaffungsquoten der CVD gibt es trotz ihrer Bedeutung für die Erreichung der Emissionsziele im Verkehrsbereich auch einige Ausnahmen (§4 SaubFahrzeugBeschG) für bestimmte Fahrzeuge oder Anwendungsfälle:

- Fahrzeuge, die nicht geeignet zur Güter- oder Personenbeförderung sind, z.B. Straßeninstandhaltungsfahrzeuge, Kehrmaschinen
- Landwirtschaftliche und forstwirtschaftliche Fahrzeuge
- Fahrzeuge, die zur Verrichtung hoheitlicher Aufgaben dienen oder speziell konzipiert, gebaut oder angepasst wurden, z.B. für Zivil- und Katastrophenschutz, das Rettungswesen, die Feuerwehr, die Polizeibehörden sowie des Zolls
- Reisebusse und Überlandbusse

- Fahrzeuge, die ausschließlich für eine militärische Nutzung entwickelt, gebaut oder angepasst wurden

Die genannten Ausnahmen stehen jedoch in einer direkten Abhängigkeit von Marktverfügbarkeit und fortlaufendem technischem Fortschritt. So ist langfristig bei einer entsprechenden Verfügbarkeit an entsprechenden Fahrzeugen damit zu rechnen, dass die Anzahl der nicht von der CVD betroffenen Bereiche kleiner wird. Daher sollt bereits jetzt bei entsprechender Verfügbarkeit eines CVD-konformen Fahrzeugs diese Variante bevorzugt beschafft werden. Dadurch kann eine langfristige Nutzung sowie die spätere Anrechenbarkeit auf die Beschaffungsquote erreicht werden (vgl. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV), S.10 f; 2020).

3 Überblick über Fahrzeugtechnologien

Damit die Beschaffungsquoten aus der CVD erreicht werden können, stehen den Verkehrsbetrieben verschiedene Fahrzeug- bzw. Antriebskonzepte zur Verfügung. Bislang war jedoch die Auswahl von geeigneten und verfügbaren Fahrzeugtypen das Nadelöhr bei der Beschaffung solcher Fahrzeuge. Durch die in der letzten Zeit global stark gestiegene Nachfrage von batterieelektrischen Bussen bzw. Brennstoffzellenbussen kommt es zu mehreren positiven Effekten. Zum einen steigt die Zahl der Hersteller, die solche Fahrzeuge anbieten und damit auch die Modellauswahl und zum anderen führt eine größere Nachfrage zu langfristig sinkenden Preisen pro Fahrzeug.

Zur Erfüllung der Beschaffungsquoten für den Anteil der „sauberen Fahrzeuge“ können die in Abschnitt 2.1 beschriebenen Antriebstopen und Kraftstoffe genutzt werden. Um den Anteil der „emissionsfreien Fahrzeuge“ zu erreichen, müssen die beschafften Fahrzeuge gemäß CVD mit Wasserstoff oder Strom angetrieben werden (vgl. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV); 2020). Im folgenden Kapitel werden diese Fahrzeugtechnologien näher beschrieben.

3.1 Elektrobusse

Batterieelektrische Fahrzeuge werden von einem Elektromotor angetrieben, der immer auf den jeweiligen Anwendungszweck des Fahrzeuges abgestimmt ist. So kommen in LKWs und Bussen vorwiegend drehmomentstarke Motoren mit einer zum PKW vergleichsweise niedrigen Endgeschwindigkeit zum Einsatz. Aufgrund der geringeren Baugröße eines Elektromotors ist es möglich, ihn flexibler innerhalb des Fahrzeugs zu platzieren. So kann er klassisch als Zentralmotor, als radnaher Motor (mit Getriebestufe) oder direkt am Rad des Fahrzeugs als

Radnabenmotor eingebaut werden.

Batterieelektrische Fahrzeuge nutzen dann die in Ihrer Batterie gespeicherte elektrische Energie, um den Motor anzutreiben. Abhängig von der Art des im Fahrzeug verbauten Motors kann eine Umwandlung des Gleichstroms aus der Batterie notwendig sein. Das in Abbildung 1 dargestellte stark vereinfachte Funktionsschema soll die Funktionsweise eines Elektrobusses nochmals verdeutlichen. Batterieelektrische Fahrzeuge zählen somit gemäß der CVD zu den emissionsfreien Fahrzeugen.

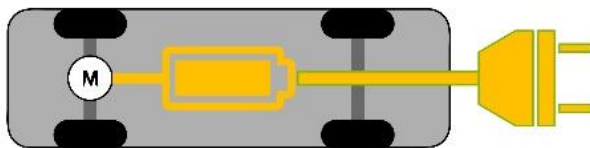


Abbildung 1: BEV Funktionsschema

Quelle: Eigene Darstellung

wendig sein. Das in Abbildung 1 dargestellte stark vereinfachte Funktionsschema soll die Funktionsweise eines Elektrobusses nochmals verdeutlichen. Batterieelektrische Fahrzeuge zählen somit gemäß der CVD zu den emissionsfreien Fahrzeugen.

Die Aufladung der Batterie kann entweder während der Betriebspause auf dem Betriebshof, also zentral, oder unterwegs entlang der Route mit einer entsprechend höheren Ladeleistung erfolgen. Dabei gilt es zu beachten, dass die Wahl der Ladestrategie die Fahrzeugparameter für die Beschaffung erheblich beeinflusst. So müssen Busse, die im Betriebshof geladen werden sollen, eine deutlich größere Batteriekapazitäten aufweisen als Busse, die entlang der Route zwischengeladen werden können. Auf weitere Details zur Ladestrategien sowie auf technische und weitere Anforderungen wird im Kapitel 5 näher eingegangen (vgl. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV), S.11 ff; 2020).

Reichweite

Trotz der immensen technologischen Fortschritte im Bereich der Hochvoltbatterien (HV-Batterie) in den letzten Jahren ist die Reichweite batterieelektrischer Fahrzeuge immer noch geringer als bei Dieselfahrzeugen. So erreicht ein neuer Batteriebus mit einer Akkukapazität von 200 bis 480 kWh nur eine Reichweite von 200 bis 400 km. Dies liegt vor allem an der hohen Energiedichte von Kraftstoffen. So hat zum Beispiel ein 150 l Dieseltank eines Busses ein gespeichertes Energieäquivalent in Höhe von ca. 1.450 kWh (ca. 9,8 kWh/l). Zusätzlich muss bei Batterien berücksichtigt werden, dass im Sinne einer möglichst langen Haltbarkeit die Batteriekapazität niemals ganz ausgenutzt werden sollte. Das Ende der Lebensdauer für einen mobilen Einsatz erreicht die Batterie bei einer Restkapazität von ca. 75 bis 80 Prozent der ursprünglichen nominellen Kapazität. Wann die Batterie jedoch diese Grenze erreicht, ist von mehreren Faktoren abhängig, z.B. von den in der Batterie enthaltenen Materialien oder der Nutzungsintensität im Betrieb. Die Alterung der Batterie sollte bereits bei der Ermittlung der für den Betrieb notwendigen Batteriekapazität berücksichtigt werden.

Fahrzeug mit Brennstoffzelle als Range Extender

Als eine mögliche Option zur Erhöhung der Reichweite eines batterieelektrischen Fahrzeugs gibt es am Fahrzeugmarkt seit einiger Zeit Fahrzeuge mit einer Brennstoffzelle als Range Extender

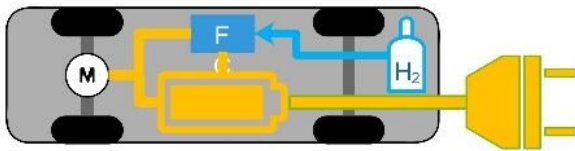


Abbildung 2: Funktionsschema BEV + BZ

Quelle: Eigene Darstellung

(siehe Funktionsschema Abbildung 2). Bei diesen Fahrzeugen handelt es sich um normale batterieelektrische Fahrzeuge, die zusätzlich mit einem Wasserstofftank und einer Brennstoffzelle ausgestattet werden. Dabei ist die Batterie weiterhin die

Hauptenergiequelle zur Bereitstellung der Antriebsenergie. Die Brennstoffzelle dient dabei primär zum Nachladen der Hochvoltbatterien während des Betriebs. Diese Kombination ermöglicht es, die Nachteile der geringeren Reichweite eines reinen BEV durch den zusätzlich von der Brennstoffzelle erzeugten Strom auszugleichen, was zu einer deutlich höheren Gesamtreichweite des Busses führt. Jedoch muss aufgrund der verbauten Doppeltechnologie auch die doppelte Infrastruktur für beide Energieträger auf dem Betriebshof vorhanden sein (vgl. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV), Emissionsfreie Energie- und Antriebskonzepte für Stadtbusse zur Umsetzung der europäischen Clean Vehicles Directive; S.11 ff, 2020). Dies kann zu deutlich höheren Kosten für die Errichtung sowie den Betrieb der notwendigen Infrastruktur führen.

3.2 Wasserstoffbusse

Aktuell gibt es zwei gängige Möglichkeiten wie Fahrzeuge mit Wasserstoff angetrieben werden können. Entweder kann der in den Druckbehältern gespeicherte Wasserstoff mittels einer Brennstoffzelle (BZ-Fahrzeug) in Strom umgewandelt werden, oder der Wasserstoff wird als ein Luft-Wasserstoffgemisch in einem klassischen Verbrennungsmotor (H_2 -Verbrenner) direkt verbrannt.

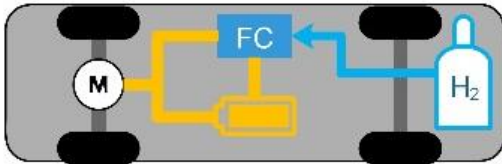


Abbildung 3: Funktionsschema BZ- Fahrzeug
Quelle: Eigene Darstellung

Beim Brennstoffzellenbus, wie in Abbildung 3 dargestellt, besitzt das Fahrzeug neben den meist auf dem Dach befindlichen Druckbehältern zusätzlich noch eine kleine Batterie zur Zwischenspeicherung des in der Brennstoffzelle erzeugten Stroms. Zusätzlich wird die durch Rekuperation beim Bremsen rückgewonnene Energie in der Batterie gespeichert

und steht so dem Fahrzeug später wieder zur Verfügung. Für diese Brennstoffzellenbusse ist in der Regel lediglich die H_2 -Infrastruktur notwendig (vgl. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV), S.11 ff; 2020).

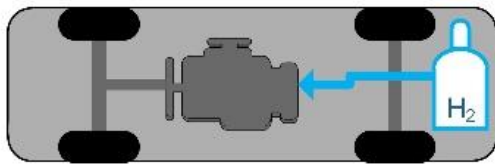


Abbildung 4: Funktionsschema H_2 - Verbrenner
Quelle: Eigene Darstellung

Die Möglichkeit einer direkten Verbrennung eines Luft-Wasserstoffgemischs in einem klassischen Verbrennungsmotor (H_2 -Verbrenner) wie in Abbildung 4 dargestellt, gibt es derzeit nur in Form von wenigen Prototypenfahrzeugen. Diese konvertierten Dieselmotoren erreichen aktuell Wirkungsgrade von ca. 45 %. Der theoretische Wirkungsgrad einer Brennstoff-

zelle liegt hingegen bei 80-90 %, im Gesamtsystem werden jedoch bedingt durch die Nebenggregate (Luftverdichter, Kühlwasserpumpe, Anodenrezirkulationsgebläse etc.) maximal 60-65 % erreicht. Trotz dieser Abstriche besteht dennoch ein nennenswerter Vorteil der Brennstoffzelle gegenüber dem Wasserstoffmotor. Es ist außerdem anzunehmen, dass es in den nächsten Jahren zu steigenden Systemwirkungsgraden kommt (vgl. AVL und ZSW im Auftrag der e-mobil BW GmbH, S. 30- 35, 2021). Weiterführende Untersuchungen zu den technologiespezifischen Eigenschaften der zwei genannten Methoden finden Sie in der Publikation der e-Mobil BW mit dem Titel [„Systemvergleich Wasserstoffverbrennungsmotor und Brennstoffzelle im schweren Nutzfahrzeug“](#).

Die Betankung beider Fahrzeugvarianten erfolgt im Regelfall mit gasförmigem Wasserstoff, der auf einen Druck von 350 bar komprimiert wurde. Hier gilt es zu beachten, dass der Betankungsvorgang nicht an jeder Wasserstofftankstelle erfolgen kann, da aktuell die meisten Tankstellen nur für die PKW-Betankung mit 700 bar ausgerüstet sind.

Durch diesen Druckunterschied der Betankung und Speicherung ist es Brennstoffzellen-LKWs oder Bussen nicht möglich, an diesen Wasserstofftankstellen zu tanken. Die Betankung an einer geeigneten Wasserstofftankstelle mit komprimiertem Wasserstoff dauert in Abhängigkeit der Tankgröße nur wenige Minuten. Unterschiede zwischen den beiden Fahrzeugvarianten gibt es bei den Qualitätsanforderungen des Wasserstoffs, so reicht für den H_2 -Verbrenner die industrietypische Wasserstoffqualität. Hingegen muss der Wasserstoff für die Brennstoffzelle nochmals gereinigt werden, um Beschädigungen oder Verunreinigungen der Brennstoffzelle zu verhindern (vgl. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV), S.12 ff,

S.22 f; 2020). Weitere Informationen zur notwendigen Infrastruktur werden in Kapitel 5.3 näher beschrieben.

Reichweite

Im Durchschnitt besitzen die Busse eine Tankkapazität zwischen 30 und 40 kg H₂. Es muss ein Restdruck von ca. 20 bar in den Druckbehältern verbleiben. Somit können ca. 90-95 Prozent der gespeicherten Wasserstoffmenge genutzt werden. Um eine bessere Vergleichbarkeit zu den gespeicherten Energiemengen der unterschiedlichen Technologien zu ermöglichen, bestimmen wir auch hier den Energieinhalt des Wasserstofftanks. So ergibt sich bei einem Energieinhalt von 33,3 kWh/kg Wasserstoffs und einer nutzbaren Energiemenge von ca. 90 Prozent ein Energieinhalt von ca. 900 bis 1.200 kWh. Bei einem angenommenen Verbrauch eines Brennstoffzellenbusses von 10,0-14,0 kg/100 km (vgl. Webseite Wikipedia; Mercedes-Benz O 530 BZH, 2021) ergibt sich somit eine Reichweite von ca. 200 bis 400 Kilometern. Analog zu den Hochvoltbatterien (vgl. Abschnitt 3.1) kommt es auch bei der elektrochemischen Reaktion in der Brennstoffzelle bedingt durch eine irreversible Spannungsdegradation zu Alterungseffekten. Dadurch verringert sich der Wirkungsgrad mit zunehmender Anzahl an Betriebsstunden und der Kraftstoffverbrauch der Brennstoffzelle steigt (vgl. AVL und ZSW im Auftrag der e-mobil BW GmbH, S. 34, 2021). Für aktuelle Brennstoffzellenbusse kann man von einer theoretischen Lebensdauer der Brennstoffzelle von 8 bis 10 Jahren ausgehen (vgl. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV), S.14 ff; 2020).

3.3 Oberleitungsbusse

Der Oberleitungsbus oder auch Trolleybus nutzt die über die Oberleitung zugeführte elektrische Energie, um den Motor anzutreiben. Diese Technologie ist bereits seit Jahrzehnten im Einsatz und gilt als äußerst robuste Antriebsform. Auch hier kann man die Oberleitungsbusstechnologie wieder in zwei Kategorien unterteilen: den klassischen Oberleitungsbus mit einem Dieselmotor als Hilfsfahraggregat und den in den letzten Jahren neu dazugekommenen Hybrid-Oberleitungsbus mit einer größeren Batterie, die auch einen Betrieb über längere Strecken ohne Oberleitungen ermöglicht (vgl. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV), S. 13 f; S. 20 f; S.28 ff, 2020).

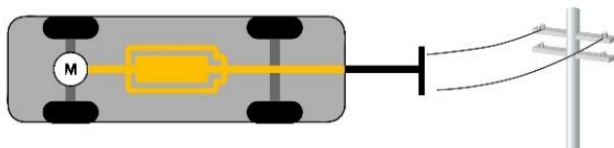


Abbildung 5: Funktionsschema Oberleitungsbus
Quelle: Eigene Darstellung

Die notwendige Energie wird dazu von einer Oberleitung, dem sogenannten Fahrdrabt, kontinuierlich abgenommen, wie in Abbildung 5 vereinfacht dargestellt. Optional könnte eine Nachladung der Batterie auch im Depot erfolgen.

Somit zählen auch Oberleitungsbusse gemäß der CVD zu den emissionsfreien Fahrzeugen. Jedoch kommt es durch die Bindung an eine Oberleitung zu Einschränkungen, da der Bau der Masten und Leitungen einen erheblichen Genehmigungs- und Kostenaufwand mit sich bringt. Zusätzlich entstehen durch die Errichtung der notwendigen Leitungsinfrastruktur hohe Kosten. Deswegen wurden die bereits beschriebenen Hybrid-Oberleitungsbusse entwickelt. Durch ihren Einsatz wird versucht, den Bau von Oberleitungen auf ein betriebliches und energetisches Minimum zu reduzieren. Weiterführende Informationen finden Sie auch unter [eBusTool/Oberleitung](#).

4 Handlungsfelder für Kommunen

4.1 Vergabeverfahren

Das Land Baden-Württemberg muss die Erfüllung der Mindestziele in Baden-Württemberg sicherstellen und überwachen. Jedoch existieren einige Sonderregelungen, um eventuelle Defizite bei der Quotenerfüllung auszugleichen. So kann das Land für seinen Zuständigkeitsbereich zulassen, dass öffentliche Auftraggeber und Sektorenauftraggeber diese nicht einhalten müssen, soweit die Mindestziele bereits durch andere öffentliche Auftraggeber oder Sektorenauftraggeber innerhalb des Landes übererfüllt werden. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, die Quote mittels einer Länderkooperation zu erreichen. Außerdem könnte über den Branchenverband eine landesübergreifende Vereinbarung getroffen werden, damit die Mindestquoten erreicht werden können. Mögliche Sonderregelungen sollen durch das kommende Landesgesetz konkretisiert werden. Bis dahin gelten allerdings die Mindestziele, die über die Referenzzeiträume erfüllt werden müssen (vgl. Dr. Obladen, kommunalwirtschaft.eu; Clean Vehicles Directive – Voraussetzungen und aktueller Stand, 2021).

Das Vergabeverfahren muss in jedem Fall dokumentiert und erfasst werden. Sowohl Entscheidungen als auch einzelne Schritte im Verfahren müssen ersichtlich sein. Hierzu gehören unter anderem:

- Die Anzahl der Fahrzeuge, die gekauft, geleast oder gemietet wurden – unterteilt nach Fahrzeugklassen.
- Die Anzahl aller sauberen leichten Nutzfahrzeuge und sauberen schweren Nutzfahrzeuge, die gekauft, geleast oder gemietet wurden – unterteilt nach Fahrzeugklassen.
- Die Anzahl aller emissionsfreien schweren Nutzfahrzeuge.
(vgl. Gaßner, Groth, Siederer & Coll; Beschaffung von Elektrobussen)

Sektorenauftraggeber müssen Aufträge ab dem Schwellenwert von derzeit 428.000 Euro europaweit ausschreiben. Für öffentliche Auftraggeber gilt ein entsprechender Schwellenwert für Aufträge ab einer Höhe von 214.000 Euro. Regelmäßig ist bereits bei der Beschaffung eines einzelnen Elektrobusses dieser Schwellenwert überschritten. Nach der Sektorenverordnung stehen für die Vergabe von Sektoraufträgen das offene Verfahren, das nicht offene Verfahren und das Verhandlungsverfahren mit Teilnahmewettbewerb zur Verfügung. Bei der Ausgestaltung des Vergabeverfahrens sind nicht nur die jeweiligen Fördermittelrichtlinien und Zuwendungsbescheide zu berücksichtigen. Wichtig ist auch eine Ausgestaltung der Anforderungen an die zu liefernden Elektrobusse. Sinnvoll kann auch die Absicherung von Garantiansprüchen sein (vgl. Cornelius Bartenbach Haesemann & Partner Rechtsanwälte (CBH), Extrablatt; Vergaberecht, 2021).

Bei Beschaffungen im Sinne des Gesetzes müssen Auftraggeber künftig nicht nur die Anzahl aller aufgrund des Auftrages vergebenen Fahrzeuge veröffentlichen, sondern dabei auch den Anteil sauberer und emissionsfreier Fahrzeuge in den Vergabebekanntmachungen nach § 39 Abs. 1 VgV und § 38 Abs. 1 SektVO bekanntgeben. Dies muss nach aktuellem Stand im Kommentarfeld des EU-Vergabe-Tool Tenders Electronic Daily erfolgen. § 5 Abs. 1 SaubFahrzeug-BeschG schreibt vor, dass die für den jeweiligen Referenzzeitraum festgelegten Mindestziele von Seiten der Auftraggeber insgesamt einzuhalten sind. Dies bedeutet, dass die Mindestziele nicht für jede einzelne Beschaffung gelten.

Zudem unterliegen dem Gesetz grundsätzlich alle neu vergebenen (siehe III.) öffentlichen Dienstleistungsaufträge im Sinne der Verordnung (EG) Nr. 1370/2007, die die Erbringung von Personenverkehrsdienstleistungen zum Gegenstand haben. Die gilt sowohl bei der Vergabe an öffentliche wie auch an oder private Verkehrsunternehmen. Hiervon ausgenommen sind Aufträge, deren geschätzter Jahresdurchschnittswert 1 Million Euro oder deren jährliche öffentliche Personenverkehrsleistung 300 000 Kilometer nicht übersteigt. Ebenfalls ausgenommen sind Aufträge, deren geschätzter Jahresdurchschnittswert 2 Millionen Euro oder deren jährliche öffentliche Personenverkehrsleistung 600.000 Kilometer nicht übersteigt, sofern die öffentlichen Dienstleistungsaufträge an Auftragnehmer vergeben werden, die nicht mehr als 23 Straßenfahrzeuge betreiben (vgl. Industrie- und Handelskammer (IHK) Dresden, Merkblatt zu den Anwendungsfällen des SaubFahrzeugBeschG für den Bereich von Busbeschaffungen, 2021).

In diesem Zusammenhang ist auch darauf hinzuweisen, dass Aufträge, deren Vergabedatum in den zweiten Bezugszeitraum fällt (d. h. nach dem 31. Dezember 2025), für diesen Zeitraum gezählt werden, auch wenn das Vergabeverfahren im ersten Bezugszeitraum (d. h. zwischen dem 2. August 2021 und dem 31. Dezember 2025) eingeleitet, aber der Zuschlag noch nicht erteilt wurde.

4.2 Unterstützende Rahmenbedingungen durch die ÖPNV-Aufgabenträger

Um den Verkehrsbetrieben den Umstieg auf emissionsfreie Antriebe zu erleichtern, haben die Kommunen in Ihrer Rolle als Gebietskörperschaften und ÖPNV-Aufgabenträger verschiedene Möglichkeiten zur Schaffung unterstützender Rahmenbedingungen. Für den Aus- oder Neubau der Betriebshöfe und der notwendigen Lade- bzw. Tankinfrastruktur können passende Flächen zur Verfügung gestellt werden oder die Kommune kann bei der Flächenfindung unterstützen. In der Rolle einer Bau- und Genehmigungsbehörde können des Weiteren Bauanträge bewilligt und entsprechende Genehmigungen prioritär erteilt werden, um die Planungs- und Umsetzungszeit der entsprechenden Vorhaben zu verkürzen. Hilfreich könnte außerdem sein, die für die emissionsfreien Fahrzeuge benötigte Lade- und Tankinfrastruktur bereits in die Ausschreibung zu integrieren. Längere Vertragslaufzeiten für die entsprechenden Verkehrsangebote könnten den Verkehrsbetrieben eine längerfristige Planungssicherheit geben. Auch eine finanzielle Unterstützung durch höhere Verwaltungsebenen bei notwendigen Neu- oder Umbauten von Bushöfen oder bei den häufig erforderlichen kostenintensiven Netzertüchtigungen könnte aus wirtschaftlichen Gründen erwogen werden. Eine Förderung von Kommunen im Bereich Neu- oder Umbauten von Bushöfen ist etwa bereits nach dem Landesgemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz (LGVFG) möglich.

4.3 Einführung alternativer Antriebstechnologien im ÖPNV: Umsetzungsprozess

Generell bedarf es intensiver Vorausplanung und Fachexpertise in den Bereichen der Verkehrsplanung, den Verkehrsbetrieben und der Kommune.

Die *Checkliste für kommunale Vertreter zum Aufbau von Elektromobilität für den ÖPNV* der **NOW GmbH** aus dem [Starterset Elektromobilität](#) bietet mit den wichtigsten Fragen von den Handlungsgründen bis hin zur medialen Verwertung einen ersten Überblick für diese Akteure:

1. Strategie und Rahmenbedingungen

Relevante Akteure: Verkehrsbetriebe, Aufgabenträger

- Welche Ziele werden mit dem Einsatz der Elektrobusse verfolgt (z. B. Erschließen von Stadtteilen, Steigerung Attraktivität des ÖPNV, Luftqualität, Lärmschutz)?
- Handelt es sich um eine Erprobung oder um eine grundsätzliche Umstellung?
- Wie fügt sich die neue Technologie in die Weiterentwicklung des Bussystems ein?
- Welche Erschließungsbedeutung hat die Linie? Wie viele tägliche Fahrgäste?
- Ist der ausgewählte Betreiber bez. Finanzkraft, technischem Know-how und verfügbarer Betreuung ausreichend ausgestattet?
- Welcher Energieträger (Strom, Wasserstoff etc.) wird eingesetzt und welche Synergien gibt es mit anderen Anwendungen (Speicher Windenergie o.ä.)
- Ist eine Versorgung mit „grüner“ Energie möglich?
- Wie sind wichtige Interessengruppen (Bürgerverbände, Umweltorganisationen etc.) in das Projekt eingebunden? Wie wird Akzeptanz und Unterstützung sichergestellt?
- Wer trägt die Mehrkosten der Erprobung bzw. des künftigen Linienbetriebes?

2. Verkehrliche und betriebliche Anforderungen

Relevante Akteure: Verkehrsbetriebe, Aufgabenträger

- Analyse und Auswahl geeigneter Linien für den Einsatz von Hybrid- oder E-Bussen: Bedarf bestimmen und vorhandene Infrastruktur erfassen, um Synergieeffekte mit bereits bestehender Infrastruktur zu nutzen
- Erfolgt der Betrieb linienrein oder umlauforientiert? Welche Auswirkungen hat dieses auf den benötigten Energiespeicher und die Versorgungsinfrastruktur?
- Welche Auswirkungen gibt es auf Produktivität und Flexibilität des Einsatzes?
- Reichen die nach dem Fahrplan bzw. der Umlaufplanung verfügbaren „unproduktiven“ Zeiten aus, um den Bus ausreichend mit Energie zu versorgen?
- Werden zusätzliche Fahrzeuge und Mitarbeiter benötigt?
- Ist die geplante Linie anfällig für Störungen (Staus, Bauarbeiten)? Wurde dieses bei der Auslegung der Ladeeinrichtungen berücksichtigt?
- Sind die Fahrer/innen ausreichend geschult, um die Fahrzeuge sicher zu bedienen?

3. Fahrzeugtechnik / Antrieb / Beschaffung

Relevante Akteure: Verkehrsbetriebe, Verkehrsingenieurbüro, Forschungspartner

- Welche Antriebstechnologie ist geeignet? Festlegung technische Spezifikationen, Ausstattungen, Reichweiten
- Welcher Energiespeicher soll eingesetzt werden?
- Hat die Technologie Auswirkungen auf die Fahrgastkapazität (Raum, Gewicht)?

- Können Nebenverbraucher (Heizung, Klimaanlage) wie gewohnt genutzt werden?
- Welche Anforderungen stellen die Systeme an den Ausbau der Werkstatt?
- Sind ausreichend geeignete Technik-Mitarbeiter vorhanden und geschult?

4. Konzept / Beschaffung Ladeinfrastruktur

Relevante Akteure: Verkehrsbetriebe, Verkehrsingenieurbüro, Forschungspartner

- Ladebedarf- und -optionen definieren
- Wie sind die Schnittstellen zwischen Fahrzeug und Infrastruktur? Gibt es schon Standards für die Ladeeinrichtungen/Schnittstellen?
- Wie werden die Ladeeinrichtungen ggf. nach Ende der Erprobung eines Fahrzeugtyps für andere Busse /Hersteller geöffnet?
- Ist der entsprechende Standort sicher nutzbar und genehmigungsfähig?
- Bei induktiven Ladesystemen: wie wird Akzeptanz rechtzeitig abgesichert?
- Bei zentraler Versorgung mit Wasserstoff: Ist die Infrastruktur für eine wachsende Zahl von Bussen ausgelegt? Ist der Ausbau genehmigungsfähig?

5. Simulation

Relevante Akteure: Forschungs- / wissenschaftliche Partner

- Ladezeiten / Ein- und Ausschleibezeiten
- Wie wird der Einsatz der Technologie (wissenschaftlich) begleitet? Welche Aussagen sollen u.a. hinsichtlich Umwelt- und Klimaschutz erreicht werden?

6. Kostenanalyse

Relevante Akteure: Verkehrsbetriebe, Projektleitstelle, Modellregion / Schaufenster

- Prüfung der Anschaffungskosten für Fahrzeugen und Infrastruktur
- Prüfung von Förderprogrammen zur Reduzierung der Investitionsmehrkosten

7. Aus- / Fortbildungsbedarf definieren & organisieren

Relevante Akteure: Verkehrsbetriebe

- Hochvoltschulungen der Werkstatt-Mitarbeiter
- Fahrerauswahl und Fahrerschulungen
- Fahrdienstmitarbeiter als Botschafter der innovativen Technologie sensibilisieren

8. Bürgerbeteiligung / Öffentlichkeitsarbeit

Relevante Akteure: Verkehrsbetriebe

- Wie sehen die Kommunikation und Außendarstellung aus (Multiplikatoren, adressatengerechte Ansprache, politische Botschaften, Events, Einbezug Kunden)?
- Wie wird das Erwartungsmanagement (Kunden, Politik) richtig gesteuert?
- Branding des Fahrzeugs: spezielle auffällige Beklebung der Fahrzeuge
- Im Fahrzeug: Fahraushänge, Infolyer, Info-Monitore zum Energiefluss in den Fahrzeugen, etc.
- Sonderfahrten und Shuttle-Fahrten

(vgl. Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie GmbH (NOW), Starterset Elektromobilität - Checkliste ÖPNV)

5 Handlungsfelder für Verkehrsbetriebe

Der Umstieg auf emissionsfreie Antriebe stellt Verkehrsunternehmen vor neue Herausforderungen. Ziel ist es zu gewährleisten, dass die Busse pünktlich und bedarfsgerecht zur Verfügung stehen und das möglichst wirtschaftlich. Dabei spielen neben der Reichweite viele weitere Einflussfaktoren und Abhängigkeiten eine Rolle. Entscheidend für das Laden/Tanken der Fahrzeuge ist die entsprechende Infrastruktur auf der Strecke oder im Betriebshof. Bei elektrischen Bussen sind außerdem die konkrete Anschlussleistung sowie mögliche Einschränkungen der elektrischen Versorgung aufgrund von Netzschwankungen zu berücksichtigen. Das Management eines emissionsfreien Fahrbetriebs erfordert ein deutlich strukturierteres Vorgehen als in der Vergangenheit. So müssen eine große Anzahl von betrieblichen und technischen Einflussparametern sowie deren vielschichtigen Abhängigkeiten berücksichtigt und optimiert ausbalanciert werden.

5.1 Energieversorgungskonzepte

Für die Versorgung von Fahrzeugen mit Strom lassen sich drei grundlegende Konzepte unterscheiden:

Übernachtladung im Depot (Vollader)

Beim Depotladen werden die Batterien auf dem Betriebsgelände geladen. Dabei werden die Busse in den Betriebspausen meistens konduktiv per Stecker nachgeladen. Die benötigte Ladeinfrastruktur hängt hierbei von der maximalen Anzahl der gleichzeitig ladenden Busse ab. Bei einer größeren Fahrzeuganzahl muss bei der Errichtung der Ladeinfrastruktur ein entsprechend ausreichender Netzanschluss für die Energiebereitstellung berücksichtigt werden.

Der Vorteil von Vollladern ist die im Vergleich zu Gelegenheitsladern höhere Flexibilität im Betrieb. Da das Laden nur im Depot stattfindet und unterwegs keine Ladestationen angefahren werden müssen, können sie sowohl im Stadt- als auch im Regionalverkehr eingesetzt werden. Umleitungen oder Straßensperrungen, die die Erreichbarkeit von Ladestationen verhindern würden oder deren Ausfall, spielen daher keine Rolle. Ebenso wird der Einsatz von Vollladern weniger durch Verspätungen beeinflusst. Den Vorteilen stehen zumindest kurz- bis mittelfristig die noch limitierten Reichweiten gegenüber (vgl. NOW GmbH; eBusTool – Batteriebusse).

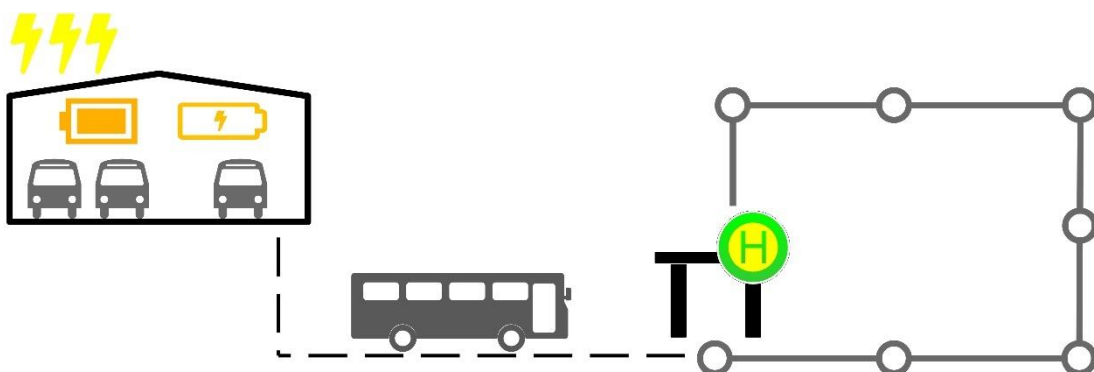


Abbildung 6: Funktionsschema Depotladen

Quelle: Eigene Darstellung

Gelegenheitsladung

Bei der Gelegenheitsladung erfolgt das Nachladen der Fahrzeuge entlang der Strecke an festgelegten Ladestationen. Dies geschieht in der Regel während der planmäßigen Aufenthaltszeiten z.B. an Endhaltestellen, wo die Batterien mithilfe hoher Ladeleistungen nachgeladen werden. Das Nachladen auf Betriebshöfen findet ergänzend statt. Das Konzept der Gelegenheitsladung findet hauptsächlich im Stadtverkehr Anwendung. Dort ist es oft möglich, mit diesem Konzept Linien zu bedienen, ohne bestehende Betriebsabläufe ändern zu müssen bzw. zusätzliche Fahrzeuge einzusetzen. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass die Fahrzeuge in regelmäßigen Zeitabständen ausreichend lange Standzeiten wahrnehmen können. Als grober Richtwert sollte für die benötigte Aufenthaltszeit an der Ladestation ca. 1/5 der Fahrzeit zur Verfügung stehen. Linien mit hoher Verspätungsanfälligkeit, bei häufigen Linienwechseln sowie bei unterschiedlichen Endhaltestellen über den Tagesverlauf hinweg sind, eignen sich für Gelegenheitsladung nicht (vgl. NOW GmbH; eBusTool – Batteriebusse).

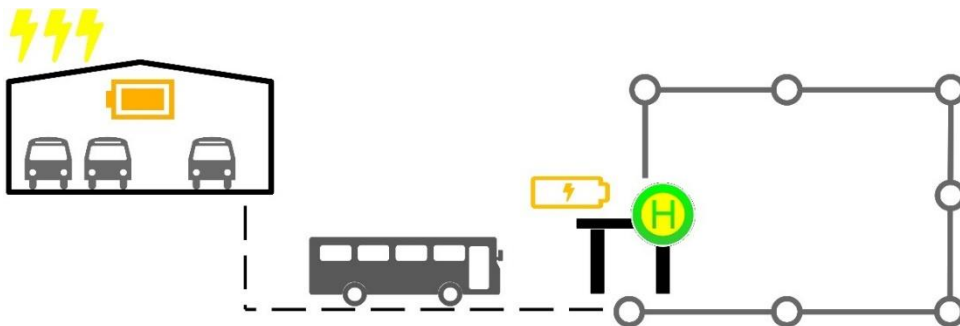


Abbildung 7: Funktionsschema Gelegenheitsladen
Quelle: Eigene Darstellung

Kontinuierliche Stromversorgung (Oberleitung)

Bei der kontinuierlichen Stromversorgung wird dem Fahrzeug der Strom während der Fahrt über eine Oberleitung zugeführt. Für dieses Konzept werden entsprechend ausgerüstete Oberleitungsbusse verwendet. Der Strom wird dabei direkt dem Elektromotor zugeführt (vgl. VDV; Emissionsfreie Energie- und Antriebskonzepte für Stadtbusse zur Umsetzung der europäischen Clean Vehicles Directive; S. 18).

Oberleitungsbusse gelten als bewährte Technologie, die in den letzten Jahrzehnten bereits in vielen Städten der Welt Anwendung gefunden hat. Insbesondere auf stark befahrenen Linien mit hoher Auslastung können sie eine wirtschaftliche Alternative zu anderen Antriebsformen bieten, da dort die Infrastruktur durch viele Fahrzeuge genutzt wird, womit sich deren Kosten auf mehr Fahrzeug-Kilometer verteilen (vgl. NOW GmbH; eBusTool – Oberleitungsbusse).

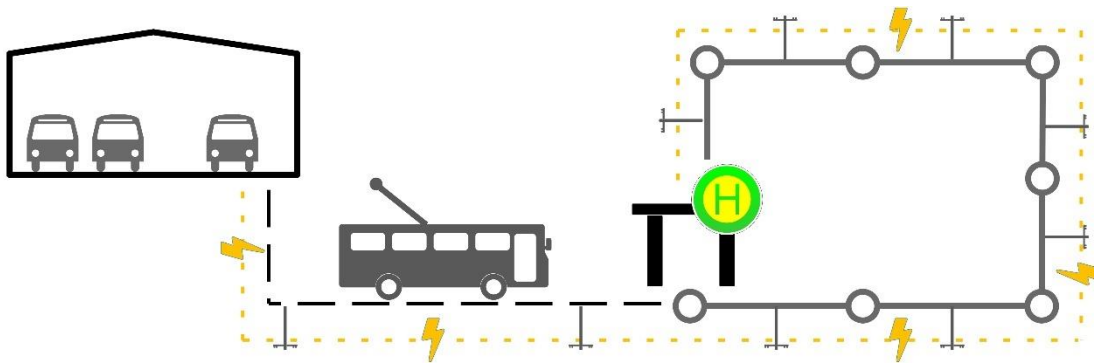


Abbildung 8: Funktionsschema Laden per Oberleitung
Quelle: Eigene Darstellung

Wasserstoff/Brennstoffzelle

Ein Vorteil beim Einsatz von brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeugen ist die vergleichsweise hohe Reichweite, die einen Einsatz sowohl im Stadt- als auch im Regionalverkehr ermöglicht. Fahrzeuge mit einer BSZ benötigen zum Nachtanken eine Wasserstofftankstelle, die üblicherweise auf dem Betriebshof des Busunternehmens gebaut wird. Dort findet eine Betankung des Fahrzeugs mit Wasserstoff in der Regel einmal täglich statt (vgl. NOW GmbH; eBusTool – Brennstoffzellenbusse). Der Tankvorgang läuft dabei ähnlich ab wie bei einer Erdgasbetankung. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass der gasförmige Wasserstoff in den Tanks der Tankstelle einen höheren Druck aufweist als der im Fahrzeugtank. Dieser Druckunterschied sorgt dafür, dass der Wasserstoff automatisch überströmt und nicht aktiv in das Fahrzeug gepumpt werden muss (vgl. VDV; Emissionsfreie Energie- und Antriebskonzepte für Stadtbusse zur Umsetzung der europäischen Clean Vehicles Directive; S. 19).

Im Wesentlichen können bei der Wasserstoffbetankung zwei Konzepte unterschieden werden:

- Fast-Filling: Klassischer Betankungsvorgang mit Komplettbetankung des Busses innerhalb einiger Minuten
- Slow-Filling: Langsame Betankung der Busse über Nacht

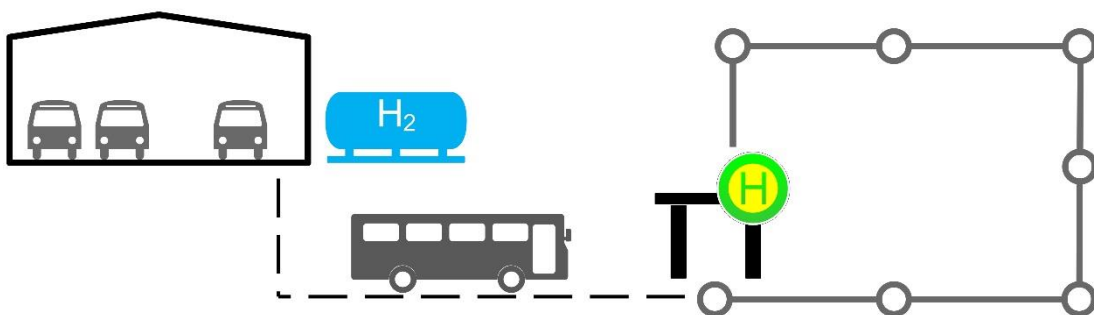


Abbildung 9: Funktionsschema Wasserstoffbetankung
Quelle: Eigene Darstellung

5.2 Aufbau der notwendigen Infrastruktur

Zentrale Herausforderungen

- Betriebshöfe sind nicht immer technisch, geografisch bzw. logistisch geeignet für eine technologische Umrüstung des Betriebs der bisherigen Linienbündel.
- Die Planung der notwendigen Infrastruktur sollte bereits in der ersten Ausbauphase die Gesamtzahl aller in Zukunft einzusetzenden Busse berücksichtigen.
- Die Verfügbarkeit von Mittelspannungsleitungen für die Gewährleistung hoher Ladekapazitäten ist Voraussetzung für den Aufbau der Ladeinfrastruktur (LIS) auf dem Betriebshof. Standorte mit einem bereits verfügbaren Mittelspannungsnetz (z. B. Industriegebiete, Straßenbahnnetz) sind hier im Vorteil.
- Für den notwendigen Netzausbau ist ein Zusammenspiel von Verkehrsunternehmen, Netzbetreiber, Energieversorger & Kommunen erforderlich.
- Für die Umrüstung eines bestehenden Betriebshofes bzw. für einen Neubau an geeigneter Stelle sollte ein zeitlicher Vorlauf von 1,5-2 Jahren berücksichtigt werden.
- Überlandlinien benötigen mit den bisherigen Reichweiten der batteriegetriebenen Busse häufig eine Zwischenladung, um wie bisher befahren werden zu können. Solche Ladestationen für Zwischenladungen erfordern weitere Investitionen, Netzertüchtigungen und Planungs- sowie Genehmigungsverfahren.
- Erforderliche Service- und Sicherheitseinrichtungen (Erhöhter Platzbedarf für die Ladestationen und statische Anforderungen an die Hallen) für emissionsfreie Busse können einen Neubau des Bushofes notwendig machen.

Quelle: e-mobil BW; White Paper: Herausforderungen bei der Umsetzung der CVD in BW

Ladeinfrastruktur auf dem Betriebshof

Ladeleistung:

Rein batterieelektrische Fahrzeuge (BEV), die im Depot geladen werden, benötigen eine entsprechend ausreichende Ladeleistung, um während der planmäßig verfügbaren Standzeiten wieder vollständig aufgeladen werden zu können. Dabei sollte grundsätzlich pro Fahrzeug ein Ladepunkt vorgehalten werden (vgl. VDV; Emissionsfreie Energie- und Antriebskonzepte für Stadtbusse zur Umsetzung der europäischen Clean Vehicles Directive; S. 25).

Die Leistung der Ladegeräte auf Betriebshöfen sowie die resultierende Gesamtanschlussleistung, die nötig ist, hängt jedoch von mehreren Faktoren ab (vgl. NOW GmbH; eBusTool – Punktuelle Ladung):

- Flottengröße
- Fahrleistung an maßgebenden Verkehrstagen (in der Regel Schultage),
- Einsatzzeiten der Fahrzeuge
- Ladestrategie (insb. Volllader vs. Gelegenheitslader vs. Batteriebusse mit Wasserstoff-Range-Extender)
- Heizungskonzept (reine Elektroheizung vs. Hybridheizung)
- Klimatisierungskonzept (Vollklimatisierung vs. Δt -Klimatisierung)

Wenn beispielsweise sechs Stunden Standzeit zur Verfügung stehen und der Energiebedarf insgesamt ca. 300 kWh beträgt, resultiert daraus eine rechnerisch benötigte Ladeleistung von mindestens 50 kW pro Fahrzeug. Möchte sich der Verkehrsbetrieb die Möglichkeit zur Zwischenladung der Fahrzeuge im Betrieb offenhalten, empfiehlt es sich, leistungsstärkere Ladepunkte zu installieren (vgl. VDV; Emissionsfreie Energie- und Antriebskonzepte für Stadtbusse zur Umsetzung der europäischen Clean Vehicles Directive; S. 25).

Netzanschluss:

Um ausreichend Energie über das Stromnetz unmittelbar am Ort und zum Zeitpunkt der Ladung bereitstellen zu können, wird in der Regel ein Mittelspannungsanschluss benötigt (10 oder 20 kV) (vgl. VDV; Emissionsfreie Energie- und Antriebskonzepte für Stadtbusse zur Umsetzung der europäischen Clean Vehicles Directive; S. 20). Ein oder mehrere Mittelspannungstransformatoren wandeln die Mittelspannung in die für die Ladegeräte notwendige Eingangsspannung (meistens 400 VAC 3 Phasen) um und verteilen sie im Betriebshof oder der Abstellanlage mittels Leitungen. Ab einem Leistungsbedarf von etwa 10 MVA kann, je nach lokaler Netzsituation, sogar ein Anschluss an das vorgelagerte Hochspannungsnetz (i. d. R. 110 kV) erforderlich sein (vgl. NOW GmbH; eBusTool – Punktuelle Ladung).

Flächenbedarf

Die Installation der Ladeinfrastruktur auf Betriebshöfen ist in vielen Fällen durch die zur Verfügung stehenden Flächen begrenzt und führt nicht selten zum Verlust von Stellplätzen. Bei der Planung der Ladeinfrastruktur sollten die folgenden Aspekte beachtet werden (vgl. NOW GmbH; eBusTool – Punktuelle Ladung):

- Die Ladegeräte sollten in der unmittelbaren Umgebung der Fahrzeuge installiert sein. Je größer der Abstand ist, umso größer sind wiederum die elektrischen Leitungsverluste.
- Die Kontaktherstellung zwischen Ladegeräten und Fahrzeugen erfolgt über Steckverbindungen oder automatisierte Kontaktsysteme.
- Der Einsatz von kabellosen Ladekonzepten wie Pantografen kann Platzeinschränkungen verhindern. Auch wenn Kabel verwendet werden, kann eine Lösung „von oben“ erfolgen, um Platz zu sparen, z. B. über Kabelrollen oder ähnliche Systeme. Hier muss jedoch beachtet werden, dass beim Einbau ausreichender Platzbedarf, etwa für die benötigte Durchfahrtshöhe, berücksichtigt wird.
- Bei Befestigungen am Dach müssen die entsprechend Dachlasten berücksichtigt werden. In der Praxis gibt es hierzu verschiedene bauliche Lösungen. In Reutlingen wurde beispielsweise ein „Ladegerüst“ in die Abstellhalle integriert (vgl. VDV; Emissionsfreie Energie- und Antriebskonzepte für Stadtbusse zur Umsetzung der europäischen Clean Vehicles Directive; S. 26).

Ladeinfrastruktur an der Strecke

Die benötigte Ladeleistung für das Gelegenheitsladen an der Strecke leitet sich ab von der Länge der Linie, dem Energieverbrauch und der verfügbaren Aufenthaltszeit an der Ladestation – beispielsweise an der Endhaltestelle. Auf einer Linie mit 30 Kilometern Länge und einem Verbrauch von 2,8 kWh/km im Worst Case benötigt ein Fahrzeug etwa 84 kWh Energie. Bei einer Standzeit von 20 Minuten wäre somit eine rechnerische Ladeleistung an der Strecke von ca. 250 kW nötig. Der Flächenbedarf für den Ladepunkt im öffentlichen Raum hängt

davon ab, welches Konzept verfolgt wird. Ist der Bau einer neuen Trafostation nötig, wird der Platzbedarf entsprechend größer. Erfolgt das Laden der Fahrzeuge über Pantografen, muss außerdem die Halteposition des Fahrzeugs an der Haltestelle genau definiert sein, um eine reibungslose Kopplung zu gewährleisten. In jedem Fall sollte der Aufbau von Gelegenheitsladern entlang der Strecke im öffentlichen Raum sorgfältig geplant werden, unter Beachtung der folgenden Aspekte (vgl. VDV; Emissionsfreie Energie- und Antriebskonzepte für Stadtbusse zur Umsetzung der europäischen Clean Vehicles Directive; S. 27):

- Planung und Genehmigungsverfahren für Ladestationen im öffentlichen Raum
- Abweichende Standzeiten an der Ladestation aufgrund von Verspätung, Stau
- Blockade der Ladestation durch unsachgemäß parkende Fahrzeuge etc.
- Reservekapazität in der Batterie, um verkürzte Ladezeiten und damit nicht vollständige Aufladung der Batterie für mind. einen weiteren Umlauf ausgleichen zu können
- Lokale Netzverträglichkeit/Netzreserve, um – wenn nötig – höhere Ladeleistungen am Ladepunkt auf Strecke zur Verfügung zu stellen
- Schnellladefähigkeit der Fahrzeugbatterie (bei Feststoffbatterien z. B. kritisch)
- Verlegung der Haltestelle bzw. des Ladepunktes (z. B. bei Bauarbeiten) ist nicht ohne weiteres möglich.

Kosten der Ladeinfrastruktur

Eine genaue Abschätzung der Kosten für die benötigte Ladeinfrastruktur ist schwierig, weil es bei den einzelnen Elementen der Ladeinfrastruktur derzeit noch sehr große Preisunterschiede gibt. Darüber hinaus hängen die konkreten Kosten stark von den jeweils lokalen Gegebenheiten ab. Die nachfolgenden Kosten sind daher nur als Anhaltswerte zu betrachten (vgl. NOW GmbH; eBusTool – Punktuelle Ladung):

- Kosten Ladegeräte: ca. 500 – 800 €/kW maximale Ladeleistung zzgl. Installations- und Verkabelungsaufwand zu den Mittelspannungstransformatoren
- Kosten Ladestationen (1 x 300 kW): ca. 350.000 – 450.000 € zzgl. Anschlusskosten und Baukostenzuschlag, inkl. Lademast und bauliche Umgestaltung
- Mittelspannungstransformatoren:
 - 1 MVA-Kompakttransformator: ca. 40.000 – 50.000 € zzgl. Installations- und Verkabelungsaufwand
 - 2 MVA-Verteilertransformator: ca. 80.000 – 120.000 € komplett inkl. Technikgebäude

Die Installationskosten und die Kosten für die Verkabelung sind je nach den Gegebenheiten auf den Betriebshöfen individuell unterschiedlich und können nicht pauschal beziffert werden. Maßgeblich für die Höhe der Anschlusskosten ist hauptsächlich die Verfügbarkeit eines ausreichend leistungsfähigen Mittelspannungsanschlusses. Wenn die Gesamtanschlussleistung nicht größer als 4 MVA beträgt, kann ein Anschluss in der Regel über bestehende Ringleitungen erfolgen. Darüber hinaus ist dann ein separater Anschluss an ein Umspannwerk notwendig. Hinzu kommen noch Baukostenzuschläge (ca. 40 – 80 € pro angemeldeter Kilowattstunde Bezugsleistung) sowie Planungs- und Verwaltungskosten. Für Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen sollten, ausgehend von einer standardisierten Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen, jährlich ca. 2,0 – 2,5 % der Investitionskosten (ohne Planungs-,

Anschluss- und Verwaltungskosten sowie Baukostenzuschüsse) verwendet werden (vgl. NOW GmbH; eBusTool – Punktuelle Ladung).

Genehmigungs- und Planungszeiträume für Ladeinfrastruktur

Zentraler Faktor beim Aufbau der Ladeinfrastruktur und dem dafür erforderlichen Anschluss an das Stromnetz sind die Technischen Anschlussbedingungen (TAB) der jeweiligen Spannungsebene – in der Regel Mittelspannung – des jeweiligen Netzbetreibers. Für die Errichtung einer Trafostation auf dem Betriebshofgelände wird außerdem die Zustimmung des Gelände-eigentümers (ggf. Stadt) benötigt. Um einen rechtssicheren Betrieb zu gewährleisten, müssen entsprechende Gestattungs- sowie Netzanschluss- und Anschlussnutzungsverträge mit dem Netzbetreiber abgeschlossen werden sowie entsprechende baurechtliche Anforderungen beachtet werden. Ist eine hohe Anschlussleistung nötig, aber die Netzkapazität begrenzt, müssen spezielle Netzuntersuchungen durchgeführt werden. Das sollte mit dem lokalen Netzbetreiber ggf. bereits bei Projektstart besprochen werden. Der Planungs- und Umsetzungszeitraum eines Anschlusses an das Mittelspannungsnetz kann etwa 5-7 Monaten umfassen, sofern keine Netzertüchtigungsmaßnahmen notwendig sind. Inklusive der Installation der einzelnen Ladeinfrastrukturkomponenten vor Ort sollte für die gesamte Errichtung der Ladeinfrastruktur mit einem Zeitraum von bis zu einem Jahr gerechnet werden. Ist ein Anschluss an das Hochspannungsnetz nötig, muss mit mindestens drei Jahren gerechnet werden (vgl. VDV; Emissionsfreie Energie- und Antriebskonzepte für Stadtbusse zur Umsetzung der europäischen Clean Vehicles Directive; S. 46):

Wasserstoffinfrastruktur

Bereitstellung von Wasserstoff

Die Bereitstellung von Wasserstoff kann auf unterschiedlichen Wegen erfolgen. Die gängigste Variante ist, gasförmigen Wasserstoff mit Trailern anzuliefern, die zwischen 400 und 1200 kg Wasserstoff fassen. Bei der Anlieferung verbindet man den Trailer mit der Tankstelle, sodass der Wasserstoff entnommen werden kann. Dies erfolgt entweder durch Überströmen in einen Niederdrucktank (ca. 30 bar) oder durch direkte Verdichtung in den Hochdrucktank (ca. 500 bar) (vgl. NOW GmbH; eBusTool – Wasserstoffbetankung).

Wasserstoffbedarf und Netzanschluss

Folgende Richtwerte können für den Wasserstoffbedarf angenommen werden:

- BSZ-Hybrid 12 m: ca. 0,09 – 0,1 kg/km
- BSZ-Hybrid 18 m: ca. 0,12 – 0,14 kg/km
- BSZ-Rex 12 m: ca. 0,04 – 0,05 kg/km
- BSZ-Rex 18 m: ca. 0,08 – 0,09 kg/km

Für die Betankung eines Solobusses (12 m) reichen somit rund 25 kg und für einen Gelenkbus etwa 33 kg Wasserstoff pro Tag (jeweils 250 km/d, BSZ-Hybrid).

Immer wenn ein Fahrzeug betankt werden soll, muss Wasserstoff auf entsprechend hohem Druck zur Verfügung stehen. Diese Aufgabe übernehmen leistungsstarke Kompressoren, die je nach Kapazität der Tankstelle bis zu einige Hundert Kilowatt Leistung benötigen. Deshalb ist es auch bei der Wasserstoffinfrastruktur wichtig, die Leistungsreserven des vorhandenen

Netzanschlusses zu prüfen und falls notwendig zu erweitern. Im Vergleich zur Ladeinfrastruktur ist die benötigte Anschlussleistung hier jedoch deutlich geringer.

Um die Versorgungssicherheit jederzeit zu gewährleisten, sollten außerdem immer ausreichende Mengen an Wasserstoff vorgehalten werden. Im Rahmen des New-Bus-Fuel-Projekts wurden in verschiedenen europäischen Städten Konzepte für eine H₂-Infrastruktur für Busse erstellt. Dort hat sich eine Zwei-Tages-Bevorratung als guter Kompromiss zwischen Investitionskosten (speziell die Wasserstoffspeicher) und Versorgungssicherheit bewährt (vgl. VDV; Emissionsfreie Energie- und Antriebskonzepte für Stadtbusse zur Umsetzung der europäischen Clean Vehicles Directive; S. 29).

Flächenbedarf

Die Komponenten einer Wasserstoffinfrastruktur können in Betriebshöfen aus technischer Sicht flexibel angeordnet werden – sollten allerdings nach Möglichkeit im Freien (Aufstellung in Containern) stehen. Der Flächenbedarf ergibt sich aus den folgenden Einzelkomponenten (vgl. NOW GmbH; eBusTool – Wasserstoffbetankung):

- Komponenten der eigentlichen Tankstelle (Verdichter, Speicher, Zapfsäule etc.)
- mindestens zwei Stellplätze für Trailer bei einem Anlieferkonzept (bzw. als Backup bei eigener Wasserstoffherstellung) für eine reibungslose Wasserstoffversorgung
- Sicherheitsabstände je nach Komponenten zwischen 3 – 5 Metern, welche sich durch geeignete Maßnahmen (z. B. Schutzwände, Poller etc.) reduzieren lassen
- Vorrichtungen zum Anfahrschutz
- gegebenenfalls Vor-Ort-Erzeugungsanlage (z. B. Elektrolyseur)

Insgesamt benötigt werden (inklusive Sicherheitsabständen und Schutzmaßnahmen, jedoch ohne Tankspur für die Busse) ca. 500 Quadratmeter Fläche. Wird zusätzlich ein Elektrolyseur aufgebaut, muss mit etwa doppelt so viel gerechnet werden (vgl. VDV; Emissionsfreie Energie- und Antriebskonzepte für Stadtbusse zur Umsetzung der europäischen Clean Vehicles Directive; S. 30).

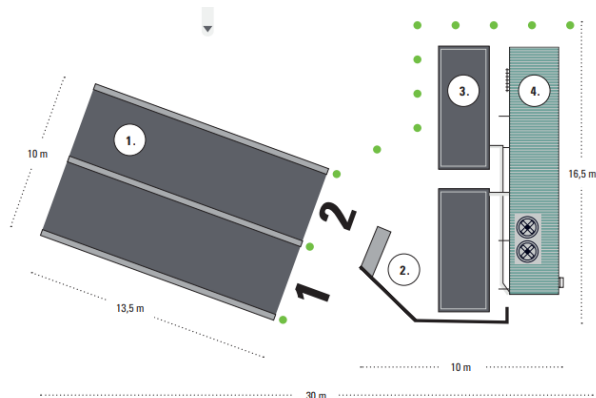


Abbildung 10: Flächenbedarf Wasserstoffinfrastruktur
Quelle: VDV; Emissionsfreie Energie- und Antriebskonzepte für Stadtbusse zur Umsetzung der europäischen Clean Vehicles Directive; S.29

Kosten für Wasserstoffinfrastruktur und Betriebshofertüchtigung

Die jeweiligen Investitionskosten für Wasserstoffinfrastruktur hängen stark von örtlichen Gegebenheiten sowie der jeweiligen Flottenzusammensetzung ab. Eine Skalierung auf größere Flotten ist unter Beachtung von Sprungkosten möglich. Hinzu kommen Kosten für die Ertüchtigung von Abstellhallen und Werkstätten (Belüftung, Wasserstoffwarnanlage) sowie die Ausrüstung der Werkstätten mit z. B. Dacharbeitsständen, die sich in Summe auf mehrere Hunderttausend Euro belaufen können. Die Wartungs- und Instandhaltungskosten hängen vom

abgeschlossenen Service-Vertrag ab und belaufen sich jährlich auf etwa zwei bis fünf Prozent der Investitionskosten (vgl. NOW GmbH; eBusTool – Wasserstoffbetankung).

Genehmigungs- und Planungszeiträume für Wasserstoffinfrastruktur

Das für die Wasserstoffinfrastruktur relevante Genehmigungsverfahren hängt erstens davon ab, ob der Wasserstoff angeliefert oder vor Ort erzeugt wird, und zweitens, ob die gelagerte Wasserstoffmenge drei Tonnen übersteigt. Sind es mehr als drei Tonnen oder wird der Wasserstoff lokal hergestellt, muss ein Genehmigungsverfahren nach Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) durchlaufen werden. Dies ist typischerweise mit höherem bürokratischem und zeitlichem Aufwand verbunden als ein Genehmigungsverfahren für eine reine Liefertankstelle mit einer Lagermenge von unter drei Tonnen Wasserstoff, das nach der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) und der Landesbauverordnung (BauO) durchgeführt werden muss. In allen Fällen ist eine Gefährdungsbeurteilung gemäß Betriebssicherheitsverordnung durchzuführen, um die standortspezifischen Randbedingungen zu berücksichtigen (vgl. VDV; Emissionsfreie Energie- und Antriebskonzepte für Stadtbusse zur Umsetzung der europäischen Clean Vehicles Directive; S. 46).

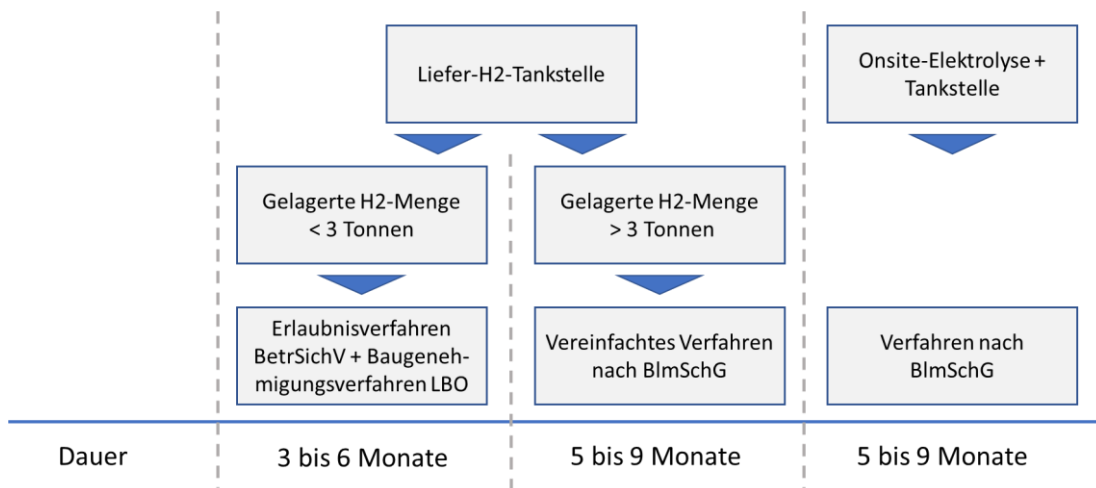


Abbildung 10: Genehmigungsverfahren Wasserstoffinfrastruktur

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis VDV; Emissionsfreie Energie- und Antriebskonzepte für Stadtbusse zur Umsetzung der europäischen Clean Vehicles Directive; S.29

Werkstattanpassung

Der Umstieg auf emissionsfreie Busse geht mit einem grundlegenden Technologiewechsel einher, der sich auch auf den Betrieb und die benötigte Ausrüstung der Werkstätten auswirkt. Durch die Arbeit an den Hochvolt-Kraftfahrzeugen ist für den Werkstattbetrieb zusätzlich zu den bisherigen Anforderungen die DIN VDE 100 ff. gültig. Da bei den batteriebetriebenen Fahrzeugen wichtige Komponenten auf dem Dach angebracht sind, müssen für entsprechende Wartungsarbeiten in den Werkstätten Dacharbeitsstände angebracht werden, um eine optimale Zugänglichkeit gewährleisten zu können. Die Arbeit an den Hochvoltkomponenten setzt außerdem voraus, dass die Fahrzeuge spannungsfrei geschaltet werden können. Sofern bereits Diesel-Hybrid-Busse eingesetzt werden, ist dies in der Regel bereits möglich. Je nach Instandhaltungstiefe kann es außerdem erforderlich sein, Prüf- und Diagnosegeräte zu beschaffen. Sofern Fahrzeuge mit Wasserstoffantrieb eingesetzt werden, muss die Werkstatt zusätzlich über H₂-Sensoren sowie geeignete Lüftungseinrichtungen verfügen, sofern eine Wasserstoffansammlung im Gebäude möglich ist. Eine Inspektion durch einen entsprechenden Gutachter kann hilfreich sein, damit auch hinsichtlich des Explosionsschutzes alle notwendigen Maßnahmen Beachtung finden (vgl. VDV; Emissionsfreie Energie- und Antriebskonzepte für Stadtbusse zur Umsetzung der europäischen Clean Vehicles Directive; S. 34).

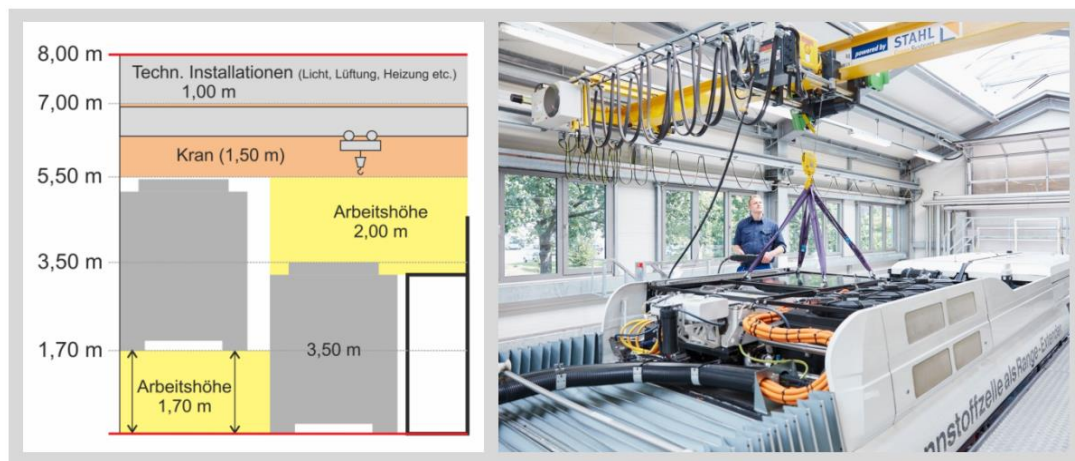


Abbildung 11: Platzbedarf Werkstattumbau für emissionsfreie Busse

Quelle: Schweizer Bundesamt für Verkehr BA, Leitfaden Flottenelektrifizierung für Busbetriebe

5.3 Beschaffung

Zentrale Herausforderungen

- Elektrofahrzeuge sind im Vergleich zu Verbrennern in der Anschaffung noch teuer. Mit steigenden Stückzahlen kann die Fertigung jedoch optimiert und die Einkaufspreise für Materialien und Zulieferkomponenten pro Einheit gesenkt werden. In wenigen Jahren ist mit einer Angleichung der Preise zu rechnen.
- Die aktuelle Verfügbarkeit von emissionsfreien Bussen kann u. U. aufgrund der internationalen Unterbrechung von Lieferketten verzögert werden.
- Aktuelle Reichweiten- und Haltbarkeitsgarantien für die Batterien umfassen aktuell noch nicht immer die gesamte Einsatzdauer der Fahrzeuge über die jeweilige Liniengenehmigung hinweg, daraus resultiert u. U. ein notwendiger Ersatz der Batterien während der geplanten Einsatzdauer.
- Von den einzelnen Herstellern werden Fahrzeuge mit unterschiedlichen Konstruktionen und technischen Ausstattungen angeboten. Ein von allen Herstellern lieferbares „Standardfahrzeug“ ist nicht verfügbar.
- Ein stufenweiser Einsatz von batteriegetriebenen Bussen neben dem Einsatz herkömmlicher Dieselsebusse erfordert den Aufbau und Betrieb einer doppelten Service- und Reparaturinfrastruktur.
- Service- und Reparaturreinrichtungen sind aus wirtschaftlichen Gründen nur auf ausgewählte Bushersteller ausgelegt, deren Fahrzeuge vornehmlich im jeweiligen Fuhrpark zum Einsatz kommen; „Fremdfabrikate“ in diesem Sinne erfordern einen höheren organisatorischen und logistischen Aufwand zu Lasten der Verfügbarkeit.

Quelle: e-mobil BW; White Paper: Herausforderungen bei der Umsetzung der CVD in BW

5.3.1 Marktentwicklung in Baden- Württemberg

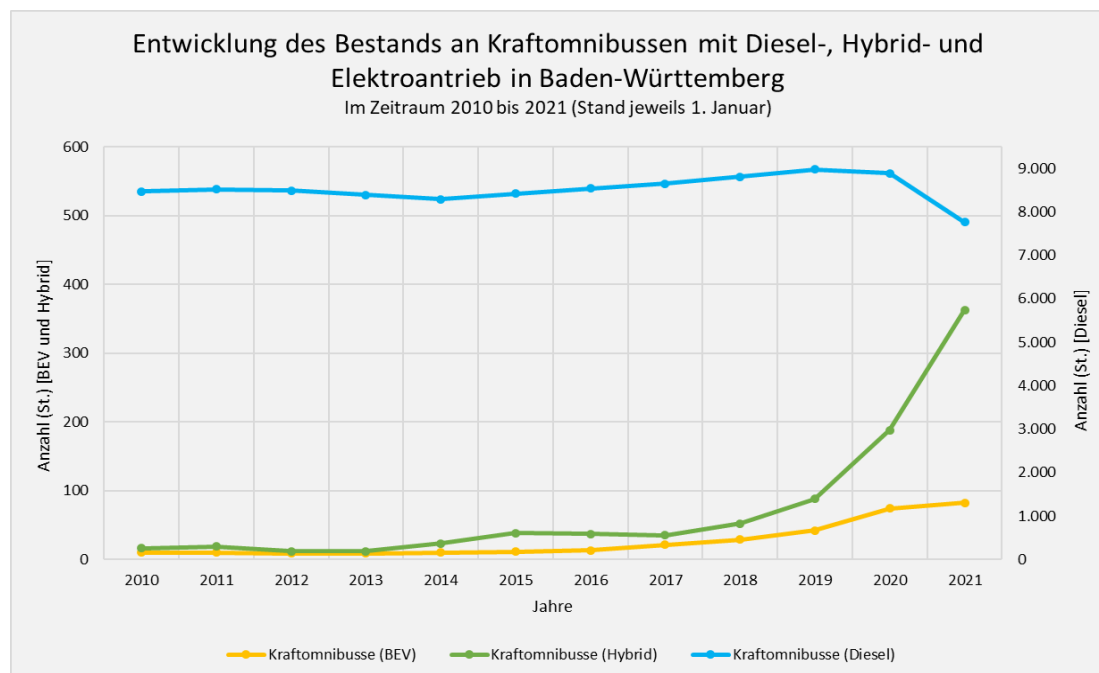


Abbildung 12: Marktentwicklung von Bussen in BW nach Antriebstechnologie

Quelle Daten: KBA; Quelle Abbildung: Eigene Darstellung

5.3.2 Marktübersicht Fahrzeuge und Infrastruktur

Kostenüberblick:

Die Kosten für Elektro- und Brennstoffzellenbusse unterliegen gegenwärtig noch enormen Preisspannen. Bei den angegebenen Kosten handelt es sich daher um erste Anhaltspunkte aus dem [eBusTool](#) der NOW GmbH. Die größte Einzelposition stellen Kosten für die Batterien und die Brennstoffzellen dar, die – nach dem derzeitigen Stand der Technik – während der Nutzungszeit der Busse mindestens einmal getauscht werden müssen.

<u>Batteriebusse</u>	Solobusse	Gelenkbusse
Volllader	520.000 – 650.000 €	k. a. D.
Gelegenheitslader	550.000 – 690.000 €	650.000 – 850.000 €
Batterien	180.000 – 220.000 €	250.000 – 300.000 €
<u>Oberleitungsbusse</u>		
Konventionelle Oberleitungsbusse	540.000 – 610.000 €	580.000 – 750.000 €
Hybrid-Oberleitungsbusse	580.000 – 670.000 €	720.000 – 950.000 €
Batterien	70.000 – 90.000 €	90.000 – 110.000 €
<u>Brennstoffzellenbusse</u>		
BSZ-Hybrid/BSZ-REX	580.000 – 650.000 €	800.000 – 850.000 €
Batterie für BSZ-Hybrid	50.000 – 60.000 €	k. a. D.
Brennstoffzelle	100.000 – 140.000 €	k. a. D.

Tabelle 2: Kostenüberblick Busse mit alternativen Antrieben

Quelle: NOW GmbH - eBusTool

Überblick Marktführer

2020 teilten sich fünf Unternehmen mehr als 80 Prozent des deutschen Marktes. Sie produzierten insgesamt 550 der eingesetzten E-Busse. Die drei aktuellen Marktführer in Deutschland sind Solaris, Mercedes Benz und VDL mit folgendem Modellangebot:

Hersteller	Modell	Fahrzeuglänge	Personenkapazität	Reichweite	Batteriekapazität	Nennleistung
Mercedes-Benz	eCitaro	12,1 m	88	150-280 km	292-441 kWh	2x125 kW
Mercedes-Benz	eCitaro G	18,1	145	150-280 km	292-441 kWh	2x125 kW
Mercedes-Benz	eCitaro F-Cell	12,1 m	84	365 km	252 kWh / 20 kg	2x125 kW

Mercedes-Benz	eCitaro G F-Cell	18,1 m	126	250 km	252 kWh / 25 kg	2x125 kW
Solaris	Urbino 12 Hydrogen	12,0 m	37+1 Sitze	350 km	29 kWh / 37 kg	2x110 kW
Solaris	Urbino 18.75 electric	18,8 m	105	200 km	120 kWh / 45 kg	240 kW
Solaris	Trollino 18	18,0 m	k. A.	k. A.	60 kWh	2x160 kW
Solaris	Urbino 12 electric	12,0 m	80	200 km	240 kWh	2x110 kW
VDL	Citea SLF-120 Electric	12,0 m	95	133 km	350 kWh	160 kW
VDL	Citea SLFA-187 Electric	18,8 m	130	k. A.	216 kWh	210 kW
VDL	Phileas 24 m	24,5 m	171	k. A.	k. A. / k. A.	k. A.

Tabelle 3: Busse mit alternativen Antrieben der drei Marktführer in Deutschland
Quelle: BMVI

Marktübersicht

Die folgende Marktübersicht stellt das breite Angebot an emissionsfreien Bussen dar. Sie wurde im Auftrag des **BMVI** und koordiniert durch die **NOW GmbH** erstellt. Verkehrsunternehmen können mit den gegebenen Informationen abschätzen, ob ein Bus mit alternativem Antrieb ihren Einsatzanforderungen entspricht. Darüber hinaus findet sich darin auch eine Marktübersicht zu Anbietern von Lade-technik.



Abbildung 13: Marktübersicht Innovative Antriebe und Fahrzeuge
Quelle: BMVI

Die Marktübersicht ist im [Starterset Elektromobilität](#) der NOW GmbH zu finden:

[→ Marktübersicht Busse & Ladeinfrastruktur](#)

5.3.3 Auswahl an Dienstleistern für Retrofitting

Unternehmen	Website	Standort	Leistung
E-Cap Mobility GmbH	www.ecap-mobility.com	Winsen (Luhe), Niedersachsen	Elektro-Umrüstungen von Dieselnissen mit Wasserstoff-Brennstoffzellen-Technologie
pepper motion GmbH	www.pepper-motion.com	Denkendorf, Baden-Württemberg	Umrüstung von Dieselnissen auf Elektroantrieb in Kooperation mit ZF. Umrüslösung aktuell für Mercedes-Benz Citaro (12m); bald: MAN A21 Dauer: 6-8 Wochen, Reichweite: ca. 250 km
Clean Logistics SE	www.cleanlogistics.de	Hamburg	Umrüstung von Dieselnissen auf H2-Brennstoffzellenantrieb Reichweite: 300km
I SEE Electric Busses GmbH	www.i-see-busses.de	Enge-Sande, Schleswig-Holstein	Umrüstung von Dieselnissen auf Elektroantrieb Verfügbarkeit innerhalb von vier Wochen

Tabelle 4: Auswahl an Dienstleistern für Retrofitting

5.3.4 ÖPNV-Beratungsunternehmen (förderfähig mit E-Bus-Beratungsgutschein)

Unternehmen
PwC
VCDB VerkehrsConsult Dresden-Berlin GmbH
EMCEL GmbH
Initiative Zukunftsmobilität
eeMobility GmbH
ebusplan GmbH
TTK GmbH
KIT Campus Transfer GmbH
EEBC European Electrical Bus Company GmbH
verkehrsprojekte.eu
SUMOCO - Sustainable Mobility Consulting GmbH
TRAPICO GmbH
Sphera Solutions GmbH
DREES & SOMMER SE
EE ENERGY ENGINEERS GmbH (EVEECON)
Wendlandt Unternehmensberatung GmbH

Tabelle 5: ÖPNV-Beratungsunternehmen

Quelle: Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg

Eine erste kostenlose Beratung zum Umstieg auf emissionsfreie Busse für Verkehrsunternehmen und öffentliche Auftraggeber im Zusammenhang mit der Umsetzung der CVD und der Förderkulisse bietet außerdem die Landesagentur [e-mobil BW](http://e-mobil.bw.laender.de) an.

5.4 Förderprogramme

Förderprogramm	Fördergeber	Fördergegenstand & Förderhöhe	Ansprechpartner
Richtlinie zur Förderung alternativer Antriebe von Bussen im Personenverkehr	BMVI	Beschaffung von Bussen mit alternativen Antrieben (Batterie- & Brennstoffzellentechnologie sowie Bio-Methan) - Zuschuss: bis zu 80 Prozent der der zuwendungsfähigen Ausgaben (Investitionsmehrausgaben) Beschaffung von nicht öffentlicher Infrastruktur zum Einsatz der Fahrzeuge - Zuschuss: bis zu 40 Prozent der zuwendungsfähigen Ausgaben Erstellung von Studien & Analysen zu Einsatzmöglichkeiten von Bussen mit alternativen Antrieben. - Zuschuss: bis zu 50 Prozent der zuwendungsfähigen Ausgaben.	Projektträger Jülich
KfW-Umweltprogramm – Umweltschutz in Unternehmen	KfW	Kredite ab 0,14 % effektivem Jahreszins in Höhe von bis zu 25 Mio. Euro für - Beschaffung von gewerblich genutzten Fahrzeugen (inkl. Busse) mit Batterie- & Brennstoffzellentechnologie - Errichtung von Ladestationen für Elektrofahrzeuge	KfW
LG VFG: Richtlinie Busförderung (2021) Neuaufgabe für das Jahr 2022 ist geplant	Min. für Verkehr BW	Beschaffung von Fahrzeugen mit batterieelektrischem Antrieb, Brennstoffzellenantrieb oder Oberleitungsbussen - Zuschuss bis zu 200.000 Euro je Fahrzeug Beschaffung von (Plug-In-)Hybridfahrzeugen, Biomethan-Fahrzeugen & Fahrzeugen mit anderen klimaneutralen Kraftstoffen - Zuschuss bis zu 40.000 Euro je Fahrzeug	L-Bank
LG VFG: Förderung LIS & H2-Tankstellen	Land BW	Errichtung von Ladeinfrastruktur und Wasserstofftankstellen in Betriebshöfen sowie Ladeinfrastruktur an Haltestellen	Regierungspräsidien BW
Beratungsgutschein E-Bus	Min. für Verkehr BW	Externe Beratungsleistungen zum Thema Umstieg auf elektrisch betriebene Busse (Für förderberechtigte Beratungs-Unternehmen s. Kapitel 5.3.4) Beratungsgutschein im Wert von 2.500 €	L-Bank

Tabelle 6: Übersicht Förderprogramme für emissionsfreie Busse

5.5 Busprojekte mit emissionsfreien Antrieben in Baden-Württemberg

Programmbegleitforschung Innovative Antriebe im Straßengebundenen ÖPNV

Mit dem Ziel die im Rahmen der verschiedenen Förderprogramme des Bundes geförderten Projekte zu Elektromobilitätsanwendungen zusammenzuführen, wurde im Rahmen der Förderrichtlinie Elektromobilität eine [programmatische Begleitforschung](#) seitens des BMVI initiiert. Die Steuerung der programmatischen Begleitforschung erfolgt für das BMVI durch die Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW).

Die Begleitforschung bündelt und wertet die Projektergebnisse aus verschiedenen Förderbereichen aus. Die Programmbegleitforschung bietet die Möglichkeit, den eigenen Flotteneinsatz hinsichtlich der technischen und wirtschaftlichen Potentiale sowie der Umweltwirkung im Gesamtkontext der im Programm geförderten Fahrzeuge einzuordnen.

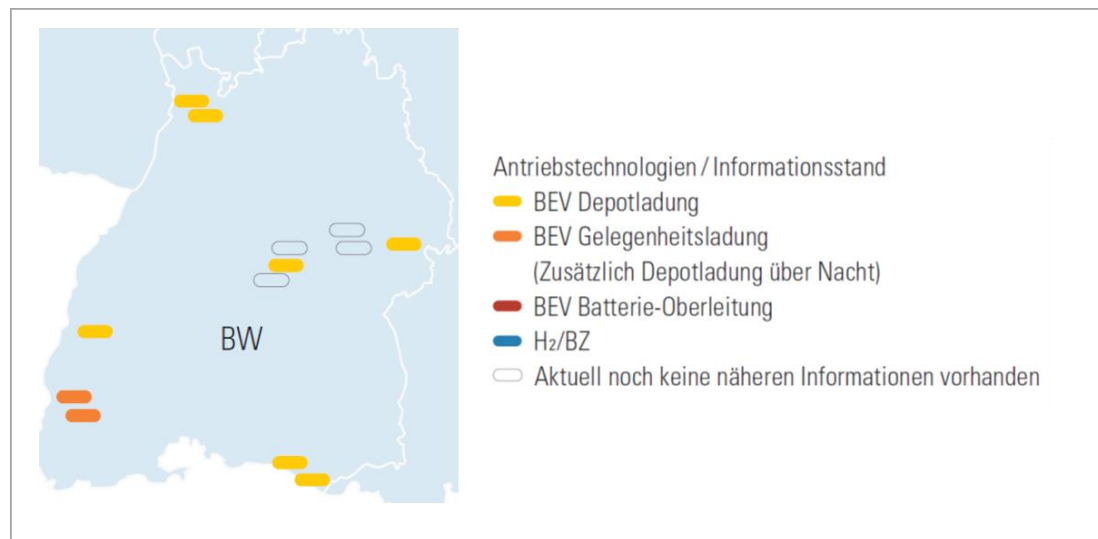


Abbildung 14: Geförderte Bus-Projekte in Baden-Württemberg
Quelle: NOW GmbH

In der folgenden Projektübersicht finden sich Detailinformationen zu den von der Bundesregierung geförderten Busprojekten in Baden-Württemberg:

DB ZugBus Regionalverkehr Alb-Bodensee GmbH:

Technologie	Batteriebus Depotladung
Förderprogramm	Förderrichtlinie zur Anschaffung von Elektrobussen im ÖPNV
Fahrzeuge	6 Solobusse; Batterietyp: nach Ausschreibung Inbetriebnahme und Lieferung (Zeitplan): • Fahrzeuge Anfang 2023 in Ravensburg-Weingarten • 1 Fahrzeug 2022 in Friedrichshafen
Energieversorgung	Depotladung 3 Ladesäulen in Ravensburg Weingarten

Freiburg VAG:

Technologie	Batteriebus Gelegenheitsladung
Förderprogramm	Förderrichtlinie zur Anschaffung von Elektrobussen im ÖPNV
Fahrzeuge	5x Solaris New Urbino 12 m-Solobus 10x Solaris New Urbino 18 m-Gelenkbus Inbetriebnahme und Lieferung (Zeitplan): • Inbetriebnahme von 4 Bus-Linien ab Juli 2022 Auslieferung der Busse: • November 2021 (10 Gelenkbusse) • Mai 2022 (5 Solobusse)
Energieversorgung	Konduktive Ladeinfrastruktur Ladekonzept: Gelegenheitsladung • 4 Schnelllader mit je 300 kW am Streckenendpunkt • Depotladung nachts mit je 80 kW
Erforderliche Anpassung Netzanschluss	Schnelllader werden über zwei neue Mittelspannungsanschlüsse versorgt. Auf dem Betriebshof entsteht eine neue Mittelspannungshauptschaltanlage. In diese wird der Bestand und die geplante sowie zukünftige Busladetechnik eingebunden. Für die Ladetechnik auf dem Betriebshof wird im Endausbau eine zusätzlich installierte Trafoleistung von 4x 1,6 MVA vorhanden sein.
Instandhaltungskonzept	Die Busse werden durch eigenes, geschultes Personal mit Unterstützung durch den Hersteller gewartet und instandgehalten. Für die Ladetechnik bestehen derzeit Wartungsverträge.
geplante Flottenumstellung	Die Umstellung auf Elektrobusse erfolgt schrittweise. Bis ins Jahr 2030 sollen 90% der Busflotte umgestellt sein.
Betriebshofumbau	Für die Elektrobusse hat derzeit der erste Bauabschnitt für eine Bus-Überdachung begonnen. Im Endausbau sollen unter diesem Dach 60 Solo- und Gelenkbusse aufgestellt und mittels Pantographen geladen werden können.
Bisherige Erfahrungen	Die VAG hat bereits 2 E- Busse seit Januar 2020 im Liniendienst eingesetzt. Die Erfahrungen mit diesen Bussen sind überwiegend positiv. Die Busse sind beim Fahrpersonal sehr beliebt und funktionieren zuverlässig, auch die Nachladetechnik verursacht im Einsatz keine Probleme. Der Hersteller der Busse hat einige Komponenten im Rahmen der Fahrzeuggarantie getauscht, auch an der Nachladestation war ein Tausch elektronischer Komponenten im Rahmen der Garantieleistungen erforderlich.

Heidenheimer Verkehrsgesellschaft HVG:

Technologie	Batteriebus Depotladung
Förderprogramm	Förderrichtlinie Elektromobilität, Sofortprogramm Saubere Luft
Fahrzeuge	3x Solaris Urbino Electric, 12 m-Solofahrzeug Batterietyp: NMC Speichergröße: 200 kWh <i>Inbetriebnahme und Lieferung: April 2020</i>
Energieversorgung	Green Depot, eigene PV-Anlage, 356 kWh 3x 40 kW, CCS-Stecker, Depot zusätzlich 150 kWh Speicher

Erforderliche Anpassung Netzanschluss	Kabelverlegung ins/im Haus (Netzertüchtigung)
Instandhaltung	Instandhaltung in eigener Werkstatt
Bisherige Erfahrungen	Hybridbus; ab. 12/21 ca. 42 e-Busse in TD-Gruppe

Stadtwerke Konstanz GmbH:

Technologie	Batteriebus Depotladung
Förderprogramm	Förderrichtlinie zur Anschaffung von Elektrobussen im ÖPNV
Fahrzeuge	6x e-Citaro (Evobus), Standardbusse (12 m) Batterietyp: LMP (Feststoff-Akku) <i>Inbetriebnahme und Lieferung (Zeitplan):</i> Lieferung voraussichtlich 30.11.2021
Energieversorgung	Konduktive Ladeinfrastruktur via CCS2-Stecker 6 DC Ladepunkte mit jeweils 150 kW Maximalleistung
Erforderliche Anpassung Netzanschluss	Neuerstellung eines Mittelspannungs-Netzanschlusses (20 kV) auf dem Betriebsgelände mit separater Trafostation für die e-Bus Ladeinfrastruktur
geplante Flottenumstellung	Bis 2035 soll die komplette Busflotte der SWK auf emissionsfreie Antriebe umgestellt sein. Dafür müssen jedes Jahr im Durchschnitt 4 neue Busse beschafft werden.
Instandhaltungskonzept	Da noch keine Erfahrung mit e-Bussen und deren Ladeinfrastruktur vorliegt, wird mit den Anbietern für die ersten Betriebsjahre ein Vollservice-Wartungsvertrag abgeschlossen
Betriebshofumstellung	Ein neuer Betriebshof ist derzeit nicht geplant. Aufgrund der sehr dynamischen Entwicklung bei der Batteriespeicher-Technologie, sowie aufgrund der noch nicht vorhandenen eigenen Erfahrungswerte, kann keine belastbare Einschätzung zum systembedingten Mehrbedarf an Bussen (und entsprechenden Platzbedarf) vorgenommen werden. Aufgrund der stetig steigenden Zuverlässigkeit der Fahrzeuge wird davon ausgegangen, dass sich der Mehrbedarf mittelfristig bei unter 20% einpendeln wird. Für die Ladeinfrastruktur müssen im Endausbau an zwei Stellen auf dem Betriebshof Trafostationen neu errichtet werden. Zudem die Gleichrichter zur Versorgung der Ladepunkte. Der Platzbedarf summiert sich auf grob geschätzt etwa 300 m ² .

Südwestdeutsche Landesverkehrs-AG (SWEG):

Technologie	Batteriebus Depotladung
Förderprogramm	BMVI, Förderrichtlinie Elektromobilität
Fahrzeuge	1x Solaris Urbino Electric, 12 m-Solofahrzeug 200 kWh, Li-Ionen Eisenphosphat (LFP), Zusatzheizung mit Dieselmotorkraftstoff (50l) Beginn Linienbetrieb: Mai 2018
Energieversorgung	Depotladung 1x 80 kW, CCS-Stecker, Depot Auch als mobiles Ladegerät an einem 125 A-Anschluss nutzbar
Bisherige Erfahrung	Technik zuverlässig, nur kleinere technische Probleme

	Reichweitenproblematik bei Betrieb mit Klimaanlage und elektrischer Heizung: 140 km im Bestfall, im Winter 120 km
Instandhaltungskonzept:	Instandhaltung durch eigene Betriebswerkstatt. Mitarbeiter wurden speziell geschult und qualifiziert. Werkzeuge (Isolationsmessgerät und Dacharbeitsstände) wurden beschafft

Rhein-Neckar Verkehr GmbH:

Technologie	Batteriebus Depotladung
Förderprogramm	BMVI, Förderrichtlinie Elektromobilität, Sofortprogramm Saubere Luft
Fahrzeuge	6x Mercedes-Benz eCitaro, 12 m-Solofahrzeug 243 kWh, Li-Ionen Nickel-Mangan-Cobalt (NMC) Beginn Linienbetrieb: • Heidelberg: Januar 2019 • Mannheim: April 2019
Energieversorgung	3x 150 kW, CCS-Stecker, Depot Mannheim 3x 150 kW, CCS-Stecker, Depot Heidelberg
Erforderliche Anpassung Netzanschluss	Keine. Im Betriebshof in Mannheim ist genügend Reserveleistung vorhanden um alle Busse zeitgleich mit 150 kW laden zu können. Auf dem Betriebshof in Heidelberg wird die Ladeleistung bei gleichzeitiger Ladung auf 50 kW je Bus begrenzt.
geplante Flottenumstellung	Je nach Markverfügbarkeit sollen ab 2021, 8 –10 Elektrobusse pro Jahr angeschafft werden, je nach Realisierbarkeit, Gelenk- sowie Solo-busse. Die komplette Umstellung (bis zu 120 Fahrzeuge) ist bis 2030 geplant.
Perspektivische Anforderungen an Betriebshof	Bei einer Vollumstellung waren bis zu 6 MW Anschlussleistung pro Betriebshof, bei einem Gleichzeitigkeitsfaktor von 1, notwendig. Mit einem intelligenten Lademanagementsystem soll diese Leistung verringert werden. Eine Umsetzung mit den aktuellen Ladesäulen für die komplette Flotte ist aus Platzgründen problematisch.
Bisherige Erfahrungen	Sehr gute Erfahrung mit den Fahrzeugen, die Erwartungen wurden übertroffen. Aktuell laufen die Fahrzeuge als Kundenfelderprober etwa 70–80 km pro Umlauf.

Rhein-Neckar Verkehr GmbH:

Technologie	Batteriebus Depotladung
Förderprogramm	BMU, Förderrichtlinie zur Anschaffung von Elektrobussen im ÖPNV
Fahrzeuge	30x 12 m-eCitaro EvoBus; Batterietyp: LMP (Feststoffbatterie) Speichergröße: 441 kWh <i>Inbetriebnahme und Lieferung (Zeitplan):</i> 22 Fahrzeuge im Jahr 2021 • Juni 2021: Start Fahrgastbetrieb • Verteilung der Busse auf die Standorte: ○ 8 in Mannheim ○ 7 in Ludwigshafen ○ 7 in Heidelberg 8 Fahrzeuge im Jahr 2022

	• Q2 2022 • Verteilung der Busse auf die Standorte: 8 in Ludwigshafen
Energieversorgung	Konduktive Ladeinfrastruktur mit DC Ladegeräten und CCS Stecker Busse sollen mit einem Gleichzeitigkeitsfaktor von 1 geladen werden, das bedeutet eine Ladestation pro Bus. Deshalb werden es insgesamt 30 Ladegeräte, Verteilung entsprechend der Busse. Ladeleistung ist Bestandteil der Ausschreibung
Erforderliche Anpassung Netzanschluss	Jeweils neue Trafostation mit 20 kV Netzanschluss auf den Betriebshöfen Mannheim, Heidelberg und Ludwigshafen
Instandhaltungskonzept:	Bestandteil Ausschreibung
Bisherige Erfahrungen	Sehr gute Erfahrungen in vorherigen Projekten. Aktuell laufen Fahrzeuge als Kundenfelderprober etwa 80-90 km pro Umlauf Tag in Heidelberg. In Mannheim laufen die Fahrzeuge aufgrund langer Ausrückwege bereits bis zu 210 – 220 km pro Tag

Reutlinger Stadtverkehrsgesellschaft mbH Hogenmüller & Kull Co. KG (RSV):

Technologie	Batteriebus Depotladung
Förderprogramm	BMVI, Sofortprogramm Saubere Luft
Fahrzeuge	12 m-Elektro-Solobusse Mercedes Benz eCitaro • Batterietyp: Lithium-NMC (Wave 1); Speichergröße: 292 kWh (davon nutzbar: 227 kWh) • Batterietyp: Lithium-NMC (Wave 2); Speichergröße: 396 kWh (davon nutzbar: 309 kWh) • Batterietyp: Feststoffbatterie; Speichergröße: 378 kWh (davon nutzbar: 340 kWh) <i>Inbetriebnahme und Lieferung (Zeitplan):</i> • 4 Fahrzeuge im Herbst 2019 • 2 Fahrzeuge im Jahr 2021 • 2 Fahrzeuge im Jahr 2021
Energieversorgung	Konduktive Ladeinfrastruktur 10 Ladesäulen (3 a 150 kW und 7 a 100 kW)
Erforderliche Anpassung Netzanschluss	Anschluss der Umspannstation an Mittelspannungs- und Fernmeldenetz (10-kV-Netz)
Instandhaltungskonzept	Wartungs- und Servicekonzept für die Ladeinfrastruktur
Bisherige Erfahrungen	Für die ersten 4 in Betrieb genommenen Elektro-Solofahrzeuge wurde vom Hersteller eine Mindestreichweite von 150 km garantiert. Dies trifft für jede Verkehrs- und Wetterbedingung zu.

Quelle: NOW GmbH

6 Literaturverzeichnis

- AVL und ZSW im Auftrag der e-mobil BW GmbH. (07 2021). Systemvergleich zwischen Wasserstoffverbrennungsmotor und Brennstoffzelle im schweren Nutzfahrzeug. (e.-m. B. Baden-Württemberg, Hrsg., e.-m. B. GmbH, & D. M. Schaloske, Redakteure) Abgerufen am 11. 03 2022 von https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/e-mobilBW-Studie_H2-Systemvergleich.pdf
- Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV). (20. 01 2021). *Gesetz über die Beschaffung sauberer Straßenfahrzeuge*. Abgerufen am 12 2021 von (Umsetzung der Clean Vehicles Directive): <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/clean-vehicles-directive.html>
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (kein Datum). www.foerderdatenbank.de. Abgerufen am 01. 12 2021 von <https://www.foerderdatenbank.de/FDB/Content/DE/Foerderprogramm/Bund/BMVI/alternative-antriebe-busse-personenverkehr.html>
- Bundesregierung. (kein Datum). www.bundesregierung.de. Abgerufen am 18. 02 2022 von <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672>
- Clean Logistics SE. (kein Datum). www.cleanlogistics.de. Abgerufen am 01. 12 2021 von <https://www.cleanlogistics.de/de/hybutt-bus.html>
- Cornelius Bartenbach Haesemann & Partner Rechtsanwälte (CBH). (01 2021). *CBH EXTRABLATT | VERGABERECHT*. Abgerufen am 2021, 2022 von WAS BESAGT DAS „SAUBERE-FAHRZEUGE- BESCHAFFUNGS-GESETZ“?: https://www.cbh.de/wp-content/uploads/2021/05/CBH_EXTRABLATT_Vergaberecht.pdf
- Dr. Obladen, H.-P. (17. 05 2021). [Kommunalwirtschaft.eu](http://kommunalwirtschaft.eu). Abgerufen am 20. 11 2021 von Clean Vehicles Directive – Voraussetzungen und aktueller Stand: <https://kommunalwirtschaft.eu/blog/202-bkrfqg/1502-clean-vehicles-directive-voraussetzungen-und-aktueller-stand>
- E-Cap Mobility GmbH. (kein Datum). ecap-mobility.com/de/. Abgerufen am 01. 12 2021 von <https://ecap-mobility.com/de/>
- I SEE Electric Busses GmbH. (kein Datum). www.i-see-busses.de. Abgerufen am 01. 12 2021 von <https://www.i-see-busses.de/>
- Industrie- und Handelskammer (IHK) Dresden. (01. 09 2021). Merkblatt zu den Anwendungsfällen des SaubFahrzeugBeschG für den Bereich von Busbeschaffungen. Abgerufen am 12 2021 von https://www.dresden.ihk.de/servlet/link_file?link_id=74018&target=display&link_zusatz=&ref_detail=News&ref_knoten_id=2916&ref_sprache=deu
- KfW. (kein Datum). www.kfw.de. Abgerufen am 01. 12 2021 von [https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-\(Inlandsf%C3%B6rderung\)/PDF-Dokumente/6000002220_M_240_241_Umwelt.pdf](https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-(Inlandsf%C3%B6rderung)/PDF-Dokumente/6000002220_M_240_241_Umwelt.pdf)
- Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg (e-Mobil BW). (2022). *White Paper: Herausforderungen bei der Umsetzung der Clean Vehicle Directive (CVD) in Baden-Württemberg*.

- Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg. (kein Datum). *vm.baden-wuerttemberg.de*. Abgerufen am 01. 12 2021 von https://vm.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-mvi/intern/Dateien/PDF/Richtlinie_Busf%C3%B6rderung_2021.pdf
- Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW GmbH. (kein Datum). *Projektübersicht 2020/2021 Zero Emission Busse in Deutschland*. (B. f. (BMVI, Hrsg.) Abgerufen am 01. 12 2021 von [www.starterset-elektromobilitaet.de: https://www.starterset-elektromobilitaet.de/content/3-Infothek/2-Publikationen/2-projektuebersicht-2020-2021-zero-emission-busse-in-deutschland/210922_busstudieneue-fassung-fin.pdf](https://www.starterset-elektromobilitaet.de/content/3-Infothek/2-Publikationen/2-projektuebersicht-2020-2021-zero-emission-busse-in-deutschland/210922_busstudieneue-fassung-fin.pdf)
- Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW GmbH. (kein Datum). *eBusTool*. Abgerufen am 01. 12 2021 von <https://www.ebustool.de/>
- Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie GmbH (NOW). (kein Datum). *Checkliste für kommunale Vertreter zum Aufbau von Elektromobilität für den ÖPNV*. Abgerufen am 07. 01 2022 von [www.starterset-elektromobilitaet.de: https://www.starterset-elektromobilitaet.de/content/1-Bausteine/5-OEPNV/checkliste_oepnv.pdf](https://www.starterset-elektromobilitaet.de/content/1-Bausteine/5-OEPNV/checkliste_oepnv.pdf)
- pepper motion GmbH. (01. 12 2021). *www.peppermotion.com/*. Von <https://www.peppermotion.com/produkte-loesungen/umruestung/> abgerufen
- Regierungspräsidien Baden-Württemberg. (kein Datum). *https://rp.baden-wuerttemberg.de/themen/wirtschaft/foerderungen/fb85/oepnv/*. Abgerufen am 01. 12 2021 von https://rp.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/RP-Internet/Themenportal/Wirtschaft/Foerderprogramme/_DocumentLibraries/OEPNV-LGVFG/00_VwV-LGVFG_.pdf
- thinkstep AG, hySOLUTIONS GmbH, VCDB VerkehrsConsult Dresden-Berlin GmbH, Fraunhofer-Institut IVI, Ingenieurgruppe IVV GmbH & Co. KG, SEK Consulting. *Programmbegleitforschung Innovative Antriebe und Fahrzeuge: Innovative Antriebe im straßengebundenen ÖPNV Bus*. (B. f. (BMVI), Hrsg.) Abgerufen am 01. 12 2021 von [starterset-elektromobilitaet.de: https://www.starterset-elektromobilitaet.de/content/3-Infothek/2-Publikationen/29-marktuebersicht-busse-im-oepnv/marktuebersicht-busse-190906.pdf](https://www.starterset-elektromobilitaet.de/content/3-Infothek/2-Publikationen/29-marktuebersicht-busse-im-oepnv/marktuebersicht-busse-190906.pdf)
- Umweltbundesamt (UBA). (17. 12 2021). *Klimaschutz im Verkehr*. Abgerufen am 12 2021 von <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/klimaschutz-im-verkehr#rolle>
- Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV). (20. 02 2020). *Emissionsfreie Energie- und Antriebskonzepte für Stadtbusse zur Umsetzung der europäischen Clean Vehicles Directive*. Abgerufen am 12 2021 von <https://www.vdv.de/emissionsfreie-energie-und-antriebskonzepte-fuer-stadtbusse.pdf?forced=true>
- VerkehrsConsult Dresden-Berlin GmbH. (kein Datum). *Leitfaden Flottenelektrifizierung für Busbetriebe*. (B. f. BAV, Hrsg.) Abgerufen am 31. 01 2022 von <https://www.bav.admin.ch/bav/de/home/allgemeine-themen/forschung-innovation/forschungs-innovationsprogramme/ESoeV2050/esoev-news/ausgaben-2020/esoev-news-februar-2020/flottenelektrifizierung-busse.html>

Wikipedia. (08 2021). *Mercedes-Benz Citaro FuelCELL-Hybrid*. Abgerufen am 18. 12 2021 von Mercedes-Benz O 530 BZH: https://de.wikipedia.org/wiki/Mercedes-Benz_Citaro_FuelCELL-Hybrid

Autoren

Marc Schleeauf, KEA Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg GmbH

Daniel Schramek, KEA Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg GmbH