

Emissionsfreie Energie- und Antriebskonzepte für Stadtbusse zur Umsetzung der europäischen Clean Vehicles Directive



Auftraggeber Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV)
Kamekestraße 37–39 · 50672 Köln
T 0221 57979-0 · F 0221 57979-8000
info@vdv.de · www.vdv.de

Berichtsdatum 20.02.2020

Im Namen der Sphera Solutions GmbH (ehemals thinkstep AG) und ihrer Tochtergesellschaften

Bericht erstellt von Dr. Michael Faltenbacher · Mfaltenbacher@sphera.com
Stefan Kupferschmid · T 0711 341817-29

Qualitätsgeprüft von Markus Wiedemann · Stuttgarter Straßenbahnen AG
Martin Schmidt · Vestische Straßenbahnen GmbH
Minh-Thuy Truong · Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV)



@DieVerkehrsunternehmen



@VDV_Verband



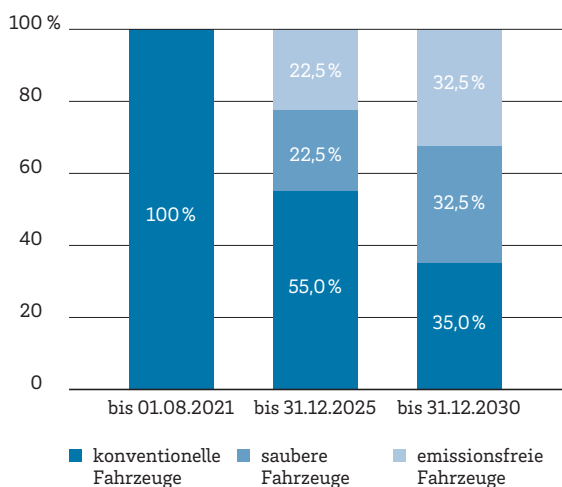
app.vdv.de

Dieser Bericht wurde von Sphera Solutions GmbH mit der angemessenen Sachkompetenz und Sorgfalt unter den im Vertrag zwischen Sphera Solutions GmbH und dem Kunden vereinbarten Bedingungen angefertigt. Sphera Solutions GmbH ist weder dem Kunden noch anderen Parteien gegenüber verantwortlich in Bezug auf Angelegenheiten, die den für das Projekt vereinbarten Rahmen überschreiten. Ungeachtet jedweder Vertraulichkeit des Berichts übernimmt Sphera Solutions GmbH keinerlei Verantwortung gegenüber Dritten, denen dieser Report (oder Teile davon) zugänglich gemacht wird. Solche Parteien stützen sich auf eigenes Risiko auf den Bericht. Interpretationen, Analysen oder Aussagen jedweder Art durch Dritte liegen außerhalb von Sphera Solutions GmbH Verantwortungsbereich. Sollten Sie Anregungen, Beschwerden oder sonstiges Feedback, diesen Bericht betreffend, haben, wenden Sie sich bitte an servicequality@sphera.com.

1	Zusammenfassung	4
2	Einleitung	8
3	Überblick zur Clean Vehicles Directive (CVD)	9
3.1	Vorgaben der Clean Vehicles Directive	9
3.2	Geltungsbereich der Clean Vehicles Directive	10
4	Fahrzeuge	11
4.1	Antriebskonzepte	11
4.1.1	Übersicht emissionsfreie Fahrzeuge	11
4.1.2	Technische Charakteristika	13
4.2	Reichweite und Energiebedarf	14
5	Energieinfrastruktur	18
5.1	Energieversorgungskonzepte	18
5.2	Lade- und Stromversorgungsinfrastruktur	20
5.3	Wasserstoffinfrastruktur	22
5.4	Auslegung der Infrastruktur	24
5.4.1	Batterieelektrische Busse mit Depotladung	25
5.4.2	Batterieelektrische Busse mit Gelegenheitsladung an der Strecke	27
5.4.3	Oberleitungsbusse	28
5.4.4	Wasserstoffangetriebene Busse mit Brennstoffzelle oder H ₂ -Verbrennungsmotor	29
5.4.5	Batterieelektrische Busse mit Brennstoffzelle als Range Extender	30
5.5	Ausbauplanung	31
6	Betriebliche Aspekte	32
6.1	Energieversorgung, Einsatzplanung	32
6.2	Wartung	32
6.3	Werkstattanpassung	34
6.4	Mitarbeiter/innen Qualifikation	35
7	Kosten	36
8	Umwelteffekte	39
8.1	Emissionen der Energieträgerbereitstellung	40
8.1.1	Elektrizität	40
8.1.2	Wasserstoff	41
8.2	Ganzheitliche Bewertung, Lebenszyklusanalyse	41
9	Weiterführende Informationen	44
9.1	Arbeitsgruppe „Innovative Antriebe Bus“ der Bundesministerien BMU und BMVI	44
9.2	Planung	44
9.3	Genehmigung	46
9.3.1	Stromversorgungsinfrastruktur	46
9.3.2	Wasserstoffinfrastruktur	46
9.4	Weiterführende Literatur	47
	Literaturverzeichnis	48
	Abbildungsverzeichnis	49

Der vorliegende Leitfaden soll anhand der zusammengestellten Informationen die Verkehrsunternehmen bei der Umsetzung der Neufassung der Clean Vehicles Directive (CVD, Richtlinie (EU) 2019/1161) der EU-Kommission unterstützen. Durch die CVD werden länderspezifisch Beschaffungsquoten¹ umweltfreundlicher Busse vorgegeben, die jeder EU-Mitgliedstaat umzusetzen hat. Diese gelten dabei für alle Fahrzeuge, die im Rahmen einer von der öffentlichen Hand vergebenen Verkehrsleistung im Nahverkehr beschafft werden. Die CVD hat damit sowohl für öffentlichen Auftraggeber und Auftragnehmer (z. B. Busbetriebe in mehrheitlich kommunalem Besitz) als auch für private Auftragnehmer (u. a. privatwirtschaftliche Unternehmen, die eine Verkehrsleistung für den Nahverkehr erbringen) Relevanz. Reisebusse (M3, Klasse III) und Überlandbusse (M3, Klasse II) sind explizit von der CVD ausgenommen.

Nach Inkrafttreten der CVD zum 2. August 2021 bis Ende 2025 müssen bundesweit mind. 45 Prozent der insgesamt in diesem Zeitraum im Rahmen neu vergebener Beförderungsaufträge beschafften bzw. eingesetzten Fahrzeuge der Definition „Saubere Fahrzeuge“ entsprechen, die Hälfte davon (mind. 22,5 Prozent) hat „emissionsfrei“ entsprechend der Definition der CVD zu sein. Ab 2026 bis Ende 2030 erhöhen sich diese Quoten auf 65 Prozent (bzw. 32,5 Prozent). Dies bedeutet jedoch nicht, dass alle Regionen und Verkehrsunternehmen gleichermaßen von diesen Quoten betroffen sind. Dies hängt maßgeblich von der noch zu erfolgenden Umsetzung der Richtlinie in nationales Recht ab.



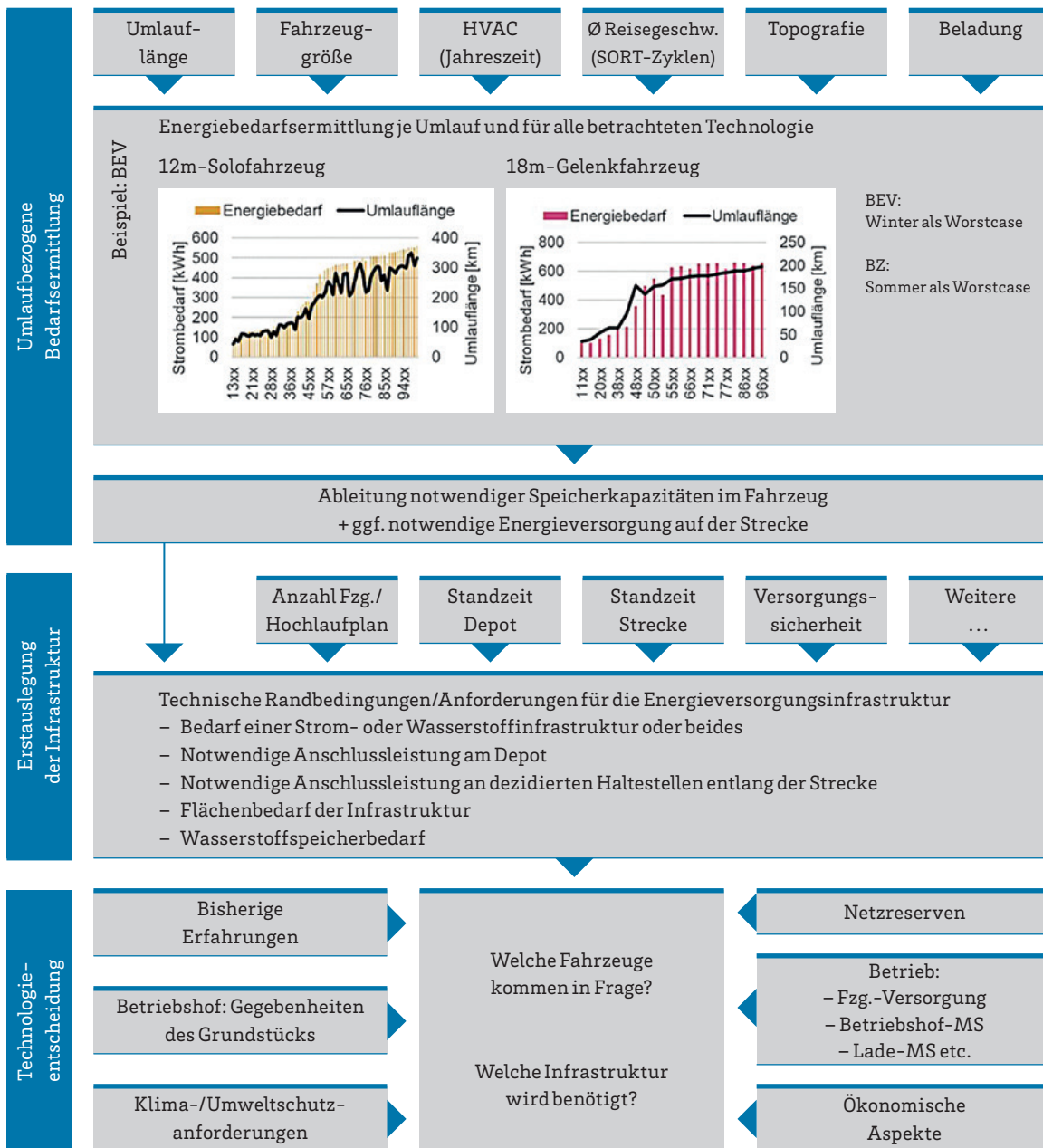
Emissionsfreie Fahrzeuge sind in der CVD als Fahrzeuge definiert, die mit Strom oder Wasserstoff betrieben werden, und gehören ebenfalls laut CVD zu den „sauberen“ Fahrzeugen². Auf „saubere“ Fahrzeuge wird im Rahmen der Schrift kurz eingegangen, der Fokus liegt jedoch auf den „emissionsfreien“ Fahrzeugen. Entsprechend der Definition der CVD gelten folgende fünf Fahrzeugtypen als „emissionsfreie“ Fahrzeuge und werden daher näher betrachtet:

- Batterieelektrische Busse (BEV) mit Depotladung
- Batterieelektrische Busse (BEV) mit Gelegenheitsladung
- Oberleitungsbusse (Obus ohne verbrennungsmotorisch betriebenen Range Extender)
- Wasserstoffbetriebene Brennstoffzellenbusse (BZ) entweder mit BZ als Hauptenergiequelle oder als zusätzliche Energiequelle für batterieelektrische Busse als Range Extender (BZ Rex)
- Wasserstoffbetriebene Busse mit Verbrennungsmotor (H₂ VM)

Die Fahrzeuge unterscheiden sich aufgrund der Energiespeicherung im Fahrzeug und des Energieversorgungskonzepts voneinander. Batterieelektrische Fahrzeuge mit Depotladung verfügen über Hochvolt(HV)-Batterien mit einer typischen Kapazität von 200 bis zu ca. 500 Kilowattstunden (kWh), was etwa für eine Reichweite von 100-240 Kilometer – je nach Einsatzbedingung – ausreichend ist. Sie werden über Nacht auf dem Betriebshof aufgeladen. Fahrzeuge mit Gelegenheitsladung werden entlang der Strecke geladen, beispielsweise an Endhaltestellen, und verfügen aufgrund dessen meist nur über geringe Batteriekapazitäten (< 150 kWh). Obusse beziehen den notwendigen Fahrstrom direkt aus einer Oberleitungsinfrastruktur und werden dynamisch im Betrieb aufgeladen. Kürzere Strecken ohne Oberleitung können über eine zusätzliche HV-Batterie an Bord oder über eine Brennstoffzelle zurückgelegt werden. Brennstoffzellenfahrzeuge bzw. Fahrzeuge mit H₂-Verbrennungsmotor verwenden gasförmigen Wasserstoff als Energieträger. Der Betankungsvorgang ist mit dem eines CNG-Busses

1 Z. B. im Rahmen direkter Beschaffung von Fahrzeugen, z. B. durch kommunale Verkehrsunternehmen

2 Zur Gruppe der „Sauberen Fahrzeuge“ laut CVD gehören: Diesel-Plug-in-Hybride sowie Fahrzeuge, die mit alternativen Kraftstoffen betrieben werden. Dies umfasst Elektrizität, Wasserstoff, Biokraftstoffe, synthetische und paraffinhaltige Kraftstoffe, Erdgas und Flüssiggas (Details siehe (Europäische Union, 2019)



vergleichbar und kann innerhalb weniger Minuten durchgeführt werden. BZ-REX-Fahrzeuge stellen im Prinzip eine Kombination aus BEV- und BZ-Fahrzeugen dar. Sie vereinen den effizienten (batterieelektrischen) Antrieb mit einer größeren Reichweite (Wasserstoff), benötigen daher neben der Lade- auch eine H₂-Betankungsinfrastruktur. Die Frage, welches Fahrzeug- und Energieversorgungskonzept für ein Verkehrsunternehmen das passende ist, kann nicht pauschal beantwortet werden. Der Leitfaden bietet eine strukturierte Vorgehensweise, um die wesentlichen Fragen beantworten zu können, die für eine Technologieentscheidung für ein Fahrzeug- und Energieversorgungskonzept relevant sind. Die Basis für die Technologieentscheidung bildet in aller Regel die umlaufbezogene Energiebedarfsermittlung. Kumuliert über alle Fahrzeuge und unter Berücksichtigung von Standzeiten, Hochlaufplänen, Fragen der Versorgungssicherheit und weiteren Randbedingungen kann damit eine Erstauslegung der Infrastruktur für die verschiedenen

Fahrzeugtechnologien erfolgen. Sie bildet die technische Basis für die finale Technologieentscheidung. Abbildung 1-1 zeigt diesen Prozess und gibt einen Überblick über die Inhalte des Leitfadens. Neben der grundsätzlichen Vorgehensweise wird im Leitfaden zudem auf die möglichen Auswirkungen des Betriebs von emissionsfreien Fahrzeugen auf den betrieblichen Ablauf sowie auf die notwendigen Mitarbeiterqualifikationsmaßnahmen eingegangen.

Konventionelle Dieselbusse sind aufgrund ihrer hohen Reichweite sehr flexibel einsetzbar. Der Energiebedarf (Dieselverbrauch) eines einzelnen Umlaufs war daher bisher kein einschränkendes Kriterium. Bei emissionsfreien Fahrzeugen spielt der Energiebedarf für das notwendige Energieversorgungskonzept und die spätere Einsatzplanung jedoch eine entscheidende Rolle und ist daher vorab so genau wie möglich zu bestimmen. Je nach Umlaufzusammensetzung können sich verschiedene Fahrzeugkonzepte für verschiedene

Einsatzkontexte als passend herausstellen. Die Auslegung der Infrastruktur von BEV-Fahrzeugen ist dabei wesentlich von der vorhandenen Standzeit und der gewünschten Flexibilität abhängig. Als grobe Faustregel kann dabei der Quotient der verbrauchten Energie³ (Kilowattstunden) und der mindestens zur Verfügung stehenden Standzeit verwendet werden. Dadurch definiert sich die mindestens notwendige Ladeleistung (Kilowatt), um dieses Fahrzeug wieder ausreichend aufzuladen. Dies gilt sowohl für die Depot- als auch für die Gelegenheitsladung an der Strecke. Für Letztere müssen aufgrund der meist kurzen Standzeit (beispielsweise an Endhaltestellen der Linie) hohe Ladeleistungen vorgesehen werden. Diese liegen je nach Anwendung üblicherweise im Bereich 200–450 kW. Grundsätzlich sind hier entsprechende Sicherheiten mit einzuplanen. Je nach Flottengröße kann die notwendige Anschlussleistung am Betriebshof schnell in den Megawatt-Bereich ansteigen. Der Netzanbindung und dem Aufbau der passenden Stromversorgungsinfrastruktur kommt dabei eine besondere Rolle zu. Hier gilt es bereits vorab, den lokalen Netzbetreiber mit einzubinden. Dadurch können zum einen die teils sehr hohen Anschlusskosten bestmöglich reduziert werden, zum anderen können mögliche Restriktionen beispielsweise hinsichtlich der vorhandenen Netzreserve frühzeitig erkannt werden und gegebenenfalls erforderliche Netzertüchtigungsmaßnahmen identifiziert werden.

Oberleitungsbusse sind aktuell in drei deutschen Städten zu finden⁴, die Technologie eignet sich grundsätzlich jedoch genauso wie Batteriebusse und H₂-/Brennstoffzellenbusse zur Erfüllung der Vorgaben der CVD. Durch einen zusätzlichen Energiespeicher an Bord (HV-Batterie oder Wasserstofftanks) können gewisse Strecken (üblicherweise mindestens 10–15 km) auch ohne

Oberleitung zurückgelegt werden. Dies ist insbesondere bei städtebaulich sensiblen Streckenabschnitten (z. B. in denkmalgeschützten Altstädten) relevant oder ermöglicht, die Erweiterung des bedienbaren Streckennetzes ohne weitere kostenintensive Oberleitungsinfrastruktur zu installieren.

Die Infrastruktur für Fahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb besteht aus einer Wasserstofftankstelle und gegebenenfalls einer Vor-Ort-Erzeugung des Wasserstoffs, z. B. über eine Wasserelektrolyse unter Einsatz möglichst erneuerbaren Stroms. Auch hier ist die Ermittlung des Energiebedarfs der Umläufe ausschlaggebend für die Auslegung der H₂-Speicherkapazität an Bord der Busse und damit unmittelbar verknüpft die Auslegung der H₂-Tankstelle. Der gesamte tägliche Wasserstoffbedarf der Flotte im Worst Case (bei BZ-Fahrzeugen ist dies meist der Sommerbetrieb) definiert die notwendige H₂-Speichermenge. Hier hat sich eine Zwei-Tages-Bevorratung als guter Kompromiss zwischen Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit erwiesen. Damit alle Fahrzeuge in einem gewünschten Zeitfenster betankt werden können, ist die H₂-Tankstelle hinsichtlich Druckspeicherkapazitäten und Kompressionsleistung entsprechend ausreichend zu dimensionieren. Der Anschluss an eine bestehende H₂-Pipeline bietet ideale Voraussetzungen und reduziert die Speicherkapazität sowie den H₂-Transport auf der Straße. Für BZ-REX Fahrzeuge ist sowohl eine Ladeinfrastruktur als auch eine Betankungsinfrastruktur vorzuhalten. Die grundsätzlichen Aspekte sind dabei vergleichbar mit denen der BZ-Fahrzeuge (für H₂) bzw. der BEV-Fahrzeuge mit Depotladung (Strom).

Wesentlich für den Erfolg einer neu einzuführenden Antriebstechnologie ist zudem die Akzeptanz der Mitarbeiter. Sie sind im täglichen Betrieb mit den Fahrzeugen und den damit verbundenen Implikationen konfrontiert. Der Betrieb emissionsfreier Fahrzeuge hat Einfluss auf die Versorgung der Fahrzeuge, den betrieblichen Ablauf auf Linie und im Depot, die Einsatzplanung, die Wartung der Fahrzeuge und den Werkstattbetrieb. Entsprechende Einweisungen und die umfassende Ausbildung der betroffenen Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen sind dabei unerlässlich.

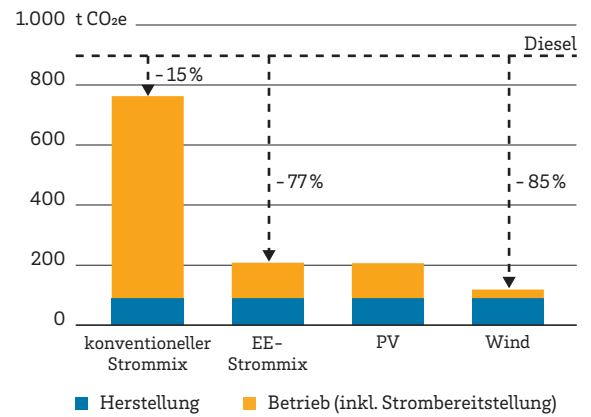
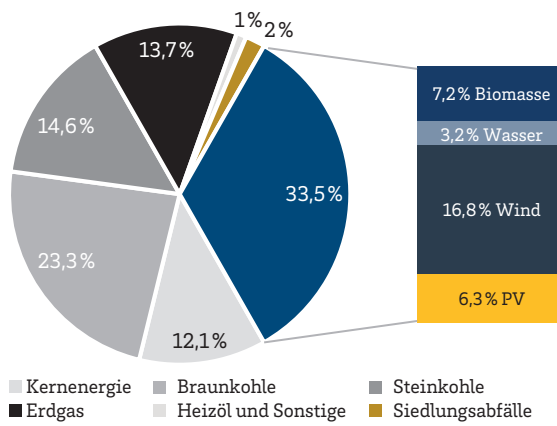
Die Umstellung von konventionellen, (meist) dieselbetriebenen Fahrzeugflotten stellt die meisten Busbetriebe zudem vor ökonomische Herausforderungen. Die Kosten für die Energieversorgungsinfrastruktur (inkl. Netzanbindung, Transformator) müssen ebenso gestemmt werden wie die aktuell noch höheren Fahrzeugkosten. Wesentliche

1-2 | H₂-Tankstelle/Ladeinfrastruktur (SSB)



3 Neben der benötigten Antriebsenergie hat das Heizungs- und Klimatisierungskonzept des batterieelektrischen Busses gerade an warmen bzw. kalten Tagen einen wesentlichen Einfluss auf den Energieverbrauch eines batterieelektrischen Busses. Wird im Sinne eines vollständig elektrischen Antriebskonzeptes die Heizleistung für Fahrer Arbeitsplatz und Fahrgastraum elektrisch erbracht, verringert sich die Reichweite an kalten Tagen um bis zu 50 Prozent.

4 Esslingen, Eberswalde und Solingen. Zudem gibt es aktuelle Diskussionen zum Test von Oberleitungsbussen in Berlin-Spandau.



1-3 | Darstellung des deutschen Strommixes im Jahr 2017 (links) sowie Treibhausgasemissionen über den Lebenszyklus eines batterieelektrischen 12-m-Fahrzeugs im Vergleich zum Dieselbus (rechts) (Sphera)

Aspekte sind weiterhin die Wartungskosten (begrenzte Lebensdauer von Batterien und Brennstoffzelle) sowie die Kosten für die Energieträger Strom und Wasserstoff. Pauschalisierte Aussagen zu den Mehrkosten emissionsfreier Fahrzeuge im Vergleich zu Dieselfahrzeugen sind aufgrund der hohen Dynamik am Markt und der spezifischen Anforderungen der verschiedenen Verkehrsbetriebe nicht seriös möglich, sondern sind jeweils für den betrachteten Verkehrsbetrieb individuell zu ermitteln.

Der Beitrag (lokal) „emissionsfreier“ Fahrzeuge für die Luftqualität in den Städten ist unbestritten. Die Fahrzeuge stoßen im Betrieb keine Schad- und Treibhausgasemissionen aus. Um eine ganzheitliche Betrachtung – speziell der Klimaauswirkungen – emissionsfreier Fahrzeuge durchführen zu können, hilft das Instrument der Ökobilanz. Dabei werden die Emissionen der Fahrzeugherstellung ebenso mitberücksichtigt wie die Emissionen, die bei der Erzeugung von Strom und Wasserstoff

entstehen. Es zeigt sich, dass unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus der Fahrzeuge (Well-to-Wheel) inkl. Herstellung und Entsorgung deutliche Treibhausgaseinsparungen möglich sind, sofern regenerativ erzeugter Strom bzw. Wasserstoff genutzt wird (beispielhaft dargestellt in der folgenden Abbildung für ein batterieelektrisches 12-m-Fahrzeug).

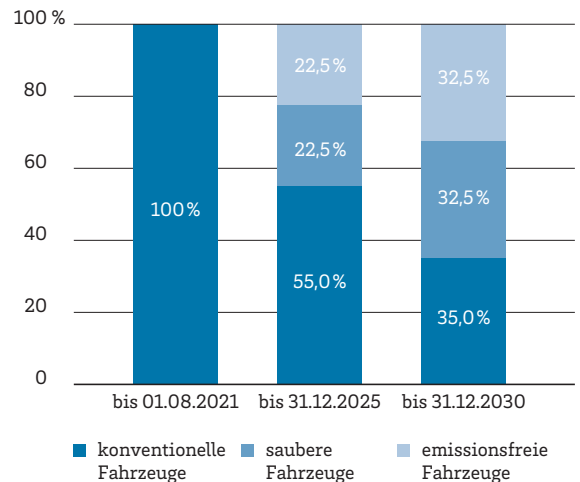
Über den Lebenszyklus eines Dieselmotors werden etwa 900 Tonnen Treibhausgase (in CO₂e) ausgestoßen (inkl. Herstellung und Recycling des Fahrzeugs sowie Bereitstellung und Verbrennung des Dieselmotors). Wird ein batterieelektrisches Fahrzeug mit dem aktuellen Strommix geladen, lassen sich bei gleicher Fahrleistung nur relativ geringe CO₂e-Einsparungen (ca. -15 Prozent) gegenüber dem Dieselfahrzeug erzielen. Wesentlich höher fällt die Einsparung bei der Verwendung von regenerativ erzeugtem Strom aus (bis zu knapp 80 Prozent).

Mit Inkrafttreten der Clean Vehicles Directive (CVD) der Europäischen Union werden erstmals verbindliche Fahrzeugbeschaffungsquoten für die Aufträge der öffentlichen Hand festgelegt. Ziel der Richtlinie ist es, den Markt für saubere und emissionsfreie Fahrzeuge durch öffentliche Beauftragungen zu stimulieren und dadurch die Wettbewerbsfähigkeit der Europäischen Union in diesem Segment zu stärken und gleichzeitig die Schadstoff- und Treibhausgasemissionen des ÖPNV weiter zu reduzieren. Die CVD umfasst neben den Beschaffungsquoten für leichte und schwere Nutzfahrzeuge auch Beschaffungsquoten für Busse. Für Letztere wird zwischen „sauberen“ und „emissionsfreien“ Fahrzeugen unterschieden, die zu gesetzlich vorgegeben Anteilen beschafft werden müssen, wobei die Anteile ab Inkrafttreten zum 2. August 2021 bzw. ab Januar 2026 nochmals erhöht werden (siehe Kapitel 3). Emissionsfreie Fahrzeuge umfassen im Sinne der CVD Fahrzeuge mit Batterie- oder Wasserstoffantrieb. Die Richtlinie gilt für Verkehrsunternehmen, die Personenbeförderungsleistungen im ÖPNV erbringen. Dies bedeutet jedoch nicht, dass alle Regionen und Verkehrsunternehmen gleichermaßen von diesen Quoten betroffen sind. Dies hängt maßgeblich von der noch zu erfolgenden Umsetzung der Richtlinie in nationales Recht ab.

Während die in der CVD definierten sauberen Fahrzeuge aus betrieblicher Sicht in der Regel mit konventionellen Dieselfahrzeugen vergleichbar sind und mit bestehender Versorgungsinfrastruktur betrieben werden können, ist dies bei den „emissionsfreien“ Fahrzeugen, d. h. batterieelektrischen bzw. Wasserstofffahrzeugen nicht der Fall. Den Vorteilen des lokal emissionsfreien Betriebs stehen Herausforderungen technischer und betrieblicher Art gegenüber. Die Infrastruktur zur Versorgung der Fahrzeuge mit der notwendigen Energie (Wasserstoff oder Strom) ist vor Ort zu installieren, und die Betriebsabläufe sind aller Voraussicht nach zumindest in Teilen anzupassen.

Der vorliegende Leitfaden richtet sich an Aufgabenträger und Busbetreiber und soll sie bei der Umsetzung der Clean Vehicles Directive unterstützen. Hierzu werden die verschiedenen Fahrzeugkonzepte beschrieben und erläutert, wie die notwendige Infrastruktur für diese Fahrzeugkonzepte auszulegen ist. Des Weiteren werden betriebliche Aspekte wie Energieversorgung und erforderliche Anpassungen der Werkstatt behandelt, der Schulungsbedarf für Mitarbeiter und Kostenparameter umrissen sowie auf die zu erwartenden Umweltentlastungen eingegangen.

Die Clean Vehicles Directive der EU-Kommission hat sich zum Ziel gesetzt, die Emissionen des Transportsektors zu reduzieren, indem Fahrzeug-Beschaffungsquoten für Aufträge der öffentlichen Hand festgelegt werden. Für die verschiedenen EU-Länder gelten dabei – abhängig von ihrem Bruttoinlandsprodukt – verbindliche Beschaffungsquoten für saubere bzw. emissionsfreie Fahrzeuge für Verkehrsbetriebe. Die Verabschiedung erfolgte durch den Rat der Europäischen Union und wurde im Amtsblatt der EU am 12.07.2019 veröffentlicht. Die Umsetzung in nationales Recht muss innerhalb von 24 Monaten erfolgen. Der erste Referenzzeitraum für die Beschaffungsquote beginnt am 02.08.2021.



3.1 Vorgaben der Clean Vehicles Directive

Die Einführung der Beschaffungsquoten für saubere bzw. emissionsfreie Fahrzeuge erfolgt in zwei Stufen. Ab Inkrafttreten der Richtlinie bis Ende 2025 müssen damit insgesamt 45 Prozent der neu beschafften Fahrzeuge „saubere“ Fahrzeuge per Definition sein. Die Hälfte davon (22,5 Prozent) muss dabei mit „emissionsfreien“ Fahrzeugen abgedeckt werden. Ab 2026 erhöht sich dieser Wert auf 65 Prozent saubere Fahrzeuge und davon die Hälfte „emissionsfrei“.

Definition „Sauberes Fahrzeug“:

Ein Omnibus gilt als „sauberes Fahrzeug“, sofern er mit alternativen Kraftstoffen, definiert nach Artikel 2 (1) der Richtlinie 2014/94/EU betrieben wird. Demnach sind „alternative Kraftstoffe“ Energiequellen, die zumindest teilweise als Ersatz für Erdöl als Energieträger für den Verkehrssektor dienen und zur Reduzierung der CO₂-Emissionen beitragen sowie die Umweltverträglichkeit des Verkehrssektors erhöhen können. Hierzu zählen unter anderem:

- Elektrizität
- Wasserstoff
- Biokraftstoffe gemäß der Definition in Artikel 2 Buchstabe i der Richtlinie 2009/28/EG
- Synthetische und paraffinhaltige Kraftstoffe
- Erdgas, einschließlich Biomethan, gasförmig (komprimiertes Erdgas (CNG)) und flüssig (Flüssigerdgas (LNG)), und
- Flüssiggas (LPG)

3-1 | Beschaffungsquoten sauberer und emissionsfreier Fahrzeuge, definiert in der CVD (EU-Richtlinie 2019/1161)

Explizit ausgeschlossen aus dieser Definition sind Biokraftstoffe, bei denen ein hohes Risiko indirekter Landnutzungsänderungen zu beobachten ist (nach Artikel 26 der Richtlinie 2018/2001). Zudem dürfen flüssige Biokraftstoffe, synthetische und paraffinhaltige Kraftstoffe nicht konventionellen fossilen Kraftstoffen beigemischt werden, d. h., sie dürfen nur in reiner (100 Prozent) Form eingesetzt werden. Plug-in-Hybridbusse, die mit konventionellem Dieselmotor betrieben werden, werden ebenfalls den „sauberen Fahrzeugen“ zugeordnet. Der Fokus dieser Schrift liegt auf den emissionsfreien Fahrzeugen. Auf die in der Auflistung genannten alternativen Kraftstoffe für saubere Fahrzeuge sowie Plug-in-Hybridbusse wird hier nicht näher eingegangen.

Definition „Emissionsfreies Fahrzeug“:

Die Kommission sieht ausschließlich Batterieelektrische Busse und Wasserstoffbrennstoffzellenbusse als „emissionsfreie Fahrzeuge“ an. Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor werden zwar genannt, jedoch nur mit einem Grenzwert von 1 g/kWh CO₂-Ausstoß akzeptiert. Dieser Grenzwert ist nach heutigem Kenntnisstand mit kohlenstoffhaltigen Kraftstoffen nicht darstellbar. Wird allerdings Wasserstoff als Kraftstoff in einem Verbrennungsmotor eingesetzt, so kann dieser Grenzwert nach eigenen Angaben der Entwickler solcher Motoren eingehalten werden.

3.2 Geltungsbereich der Clean Vehicles Directive

Grundsätzlich gelten die oben genannten Quoten in folgenden Fällen ab dem 2. August 2021:

- Fahrzeugbeschaffung öffentlicher Auftraggeber wie Städte, Kreise, Gemeinden usw.
- Beschaffung von Fahrzeugen durch Verkehrsunternehmen, die einen öffentlichen Dienstleistungsauftrag erbringen. Dazu zählen sowohl private als auch öffentliche Verkehrsunternehmen, die mit eigenwirtschaftlichen Liniengenehmigungen im Nahverkehr tätig sind.
- „Beschaffung“ von Verkehrsleistungen durch Aufgabenträger in Form von Verkehrsverträgen, Betrauungen und sonstigen öffentlichen Dienstleistungsaufträgen nach VO 1370/2007 sowie in Form von Verkehrsverträgen im Rahmen des allgemeinen Vergaberechts. Hier fallen die für die beschaffte Verkehrsleistung verwendeten Fahrzeuge unter die CVD.
- „Beschaffung“ von Verkehrsleistungen durch Sektorenauftraggeber. Sofern die Verkehrsunternehmen zur Anwendung des Vergaberechts verpflichtet sind, gilt die CVD ebenfalls.
- Die CVD gilt nur, wenn das Vergabevolumen oberhalb der EU-Schwellenwerte liegt.
- Die Clean Vehicles Directive und die Quotenregelung im Busbereich gilt ausschließlich für Fahrzeuge der Klasse M3, Klasse I mit Stehplätzen, die einen häufigen Passagierwechsel ermöglichen. Sie gilt nicht für Reisebusse (M3, Klasse III) und auch nicht für Überlandbusse (M3, Klasse II), die gemäß ECE-R 107 und EG Nr. 661/2009 zugelassen werden.

Für die Umsetzung der EU-Richtlinie in nationales Recht innerhalb eines Zeitraumes von 2 Jahren stehen dem Bundesverkehrsministerium gewisse Freiheiten zur Verfügung. So kann beispielsweise die durch die CVD vorgegebene nationale Quote in regional unterschiedliche Quotenzuordnung umgemünzt werden. Zudem motiviert die CVD die Mitgliedstaaten zur Auflage entsprechender Förderprogramme, um die Belastung der Verkehrsunternehmen zu minimieren. Preissteigerungen der ÖPNV-Tickets und Angebotsreduzierungen durch die Investitionen in emissionsfreie beziehungsweise saubere Fahrzeuge sollen damit verhindert werden. Die finale Ausgestaltung der CVD in deutsches Recht bleibt dem BMVI vorbehalten und ist abzuwarten bzw. ist seitens der betroffenen Akteure wie z. B. des VDV und der Kommunen konstruktiv zu begleiten⁵.

⁵ Alle Angaben beziehen sich auf die durch den VDV im Rundschreiben Nr. 8/2019 getätigte juristische Einordnung der CVD sowie die Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Richtlinie 2009/33/EG über die Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge vom 20.06.2019.

Zur Erreichung der Beschaffungsquoten der CVD kommen verschiedene Fahrzeug- bzw. Antriebskonzepte infrage. Der Anteil der konventionellen Antriebe kann wie bisher über die Beschaffung klassischer Dieselbusse (betrieben mit fossilem Kraftstoff) erfolgen. Für den Anteil der „sauberen Fahrzeuge“ kommen die in Abschnitt 3.1 genannten Antriebs- und Kraftstofftypen infrage.

Um den Anteil der emissionsfreien Fahrzeuge bedienen zu können, müssen die beschafften Fahrzeuge gemäß CVD mit Wasserstoff oder Strom angetrieben werden. Im folgenden Abschnitt werden diese Fahrzeugtypen im Detail erläutert.

4.1 Antriebskonzepte

4.1.1 Übersicht emissionsfreie Fahrzeuge

Gemäß CVD gilt ein Fahrzeug dann als „emissionsfreies Fahrzeug“, wenn die Emissionen im Betrieb des Fahrzeugs $< 1 \text{ g CO}_2/\text{kWh}$ betragen. Fahrzeuge, die mit Strom oder Wasserstoff betrieben werden, erfüllen diese Vorgabe.

Tabelle 4-1 gibt einen Überblick über die verschiedenen emissionsfreien Fahrzeuge. Der Antrieb der batterieelektrischen Fahrzeuge (BEV) erfolgt dabei über einen Elektromotor, der entweder als Zentralmotor, als radnaher Motor (mit Getriebe- stufe) oder als Radnabenmotor ausgeführt ist. BEV und Oberleitungsbusse nutzen die in der Batterie gespeicherte bzw. über die Oberleitung zugeführte elektrische Energie, d. h. Strom, um den Motor anzutreiben. Die Energiezufuhr geschieht dabei entweder (überwiegend) kontinuierlich (Oberleitung) oder während eines Ladevorgangs. Wie dieser Ladevorgang konkret gestaltet ist und welche Technologien und Schnittstellen dabei eingesetzt werden, wird in Kapitel 5.2 erläutert. Oberleitungsbusse (Obus) können die oberleitungsfreien Strecken über einen zusätzlich an Bord installierten Energiegenerator bedienen, in der Vergangenheit war dies üblicherweise ein Dieselmotor. Mittlerweile gibt es Modelle, die diese oberleitungsfreien Strecken über eine Traktionsbatterie bzw. eine Brennstoffzelle abdecken können. Sie zählen somit gemäß CVD zu den emissionsfreien Fahrzeugen.

Energieeffizienz und Energiespeicherung:

Grundsätzlich gilt bei emissionsfreien Fahrzeugen genau wie bei allen physikalischen Prozessen, dass jede Energieumwandlung mit Energieverlusten behaftet ist. Der Antriebsstrang (Energiespeicher zum Rad) batterieelektrischer und wasserstoffbetriebener Fahrzeuge unterscheidet sich kaum. Die in Achse, Getriebe und Elektromotor auftretenden Verluste sind daher vergleichbar. Bei batterieelektrischen Fahrzeugen treten weiterhin Verluste beim Laden und Entladen der Batterie auf. Diese sind wesentlich geringer als die Verluste, die bei der Umwandlung von Wasserstoff in Elektrizität auftreten (in der Brennstoffzelle). Des Weiteren liegt Wasserstoff nicht in elementarer Form vor und muss somit hergestellt werden. Auch hier treten Energieverluste auf, die jedoch stark vom Herstellungsverfahren abhängig sind. Aus energetischer Sicht sind direkt mit Strom betriebene Fahrzeuge am günstigsten, da hier die geringsten Umwandlungsverluste auftreten. Demgegenüber stehen jedoch die erhöhte Speicherdichte und die damit einhergehende höhere Reichweite wasserstoffbetriebener Fahrzeuge. Je nach Einsatzfeld gilt es somit abzuwägen, welche Technologie die richtige ist.

Bei wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen⁶ wird der an Bord gespeicherte Wasserstoff entweder in einer Brennstoffzelle in Strom umgewandelt (BZ-Fahrzeug) oder als Luft-Wasserstoffgemisch in einem Verbrennungsmotor verbrannt (H_2 -Verbrenner). BZ-Fahrzeuge weisen aktuell einen höheren Wirkungsgrad auf als Fahrzeuge mit H_2 -Verbrennungsmotor und werden bereits in (Klein-)Serie gefertigt. Der H_2 -Verbrenner existiert derzeit noch in keiner Fahrzeuganwendung⁷. Die Betankung beider Fahrzeugtypen mit komprimiertem Wasserstoff erfolgt über eine Zapfsäule und dauert typischerweise – je nach Tankgröße und Konfiguration der Tankstelle – weniger als zehn Minuten. Für nähere Informationen zur Infrastruktur wird auf Kapitel 5.3 verwiesen. Im Vergleich zu BEV- und Oberleitungsfahrzeugen weisen wasserstoffbetriebene Fahrzeuge aufgrund der Umwandlungsverluste einen geringeren energetischen Wirkungsgrad auf, dafür verfügen sie aktuell über deutliche Vorteile im Hinblick auf Betankungszeit und Reichweite.

Eine Sonderrolle nimmt das batterieelektrische Fahrzeug mit Brennstoffzelle als Range Extender (BZ-REX) ein. Hierbei handelt es sich um



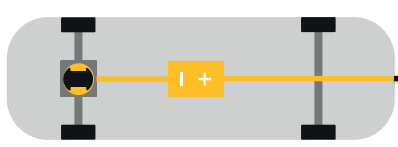

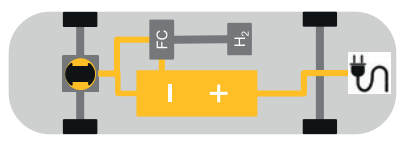

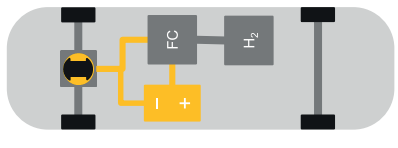

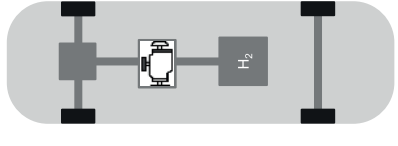

⁶ In Bussen wird der Wasserstoff typischerweise bei 350 bar gespeichert. Im Pkw-Bereich sind 700 bar üblich.

⁷ Erste Prototypenfahrzeuge mit Deutz-H₂-Motor und Keyou-Technologie sind 2020/21 zu erwarten (<https://www.keyou.de>).

ein klassisches BEV mit externer Lademöglichkeit, das zusätzlich mit Wasserstofftanks und einer Brennstoffzelle ausgestattet ist. Dies ermöglicht die Kombination der Vorteile der BEV (hoher Wirkungsgrad) und der BZ-Fahrzeuge (hohe

Reichweite). Allerdings muss damit auch die Infrastruktur für beide Energieträger – Ladeinfrastruktur für Strom und Betankungsinfrastruktur für Wasserstoff – vorgehalten werden.

Tabelle 4-1 | Übersicht emissionsfreie Fahrzeuge

	Prinzip	Foto	Reife
Strom	BEV 	 Vestische Straßenbahnen GmbH	Serie
	Obus 	 Stadtwerke Solingen GmbH	Serie
	BZ-REX 	 Hamburger Hochbahn AG	Erprobung/ Entwicklung
Wasserstoff	BZ 	 SSB	(Klein)Serie
	H ₂ -Verbrenner 	 Keyou 2019	Konzept

4.1.2 Technische Charakteristika

Strom- und wasserstoffbetriebene Fahrzeuge zeichnen sich durch die lokale Emissionsfreiheit im Betrieb aus. Dem stehen aktuell längere Versorgungszeiten (Laden, Tanken) sowie eine geringere Reichweite im Vergleich zu konventionellen Dieselnbussen gegenüber. Die Energiespeicherung und Energiezufuhr sind damit bei emissionsfreien Fahrzeugen von entscheidender Bedeutung. Tabelle 4-2 gibt einen Überblick über typische Kenndaten aktuell verfügbarer Fahrzeugtypen⁸.

Bei BEV erfolgt die Stromzufuhr entweder auf dem Depot oder direkt an der Strecke mit entsprechend hohen Ladeleistungen. Während bei Fahrzeugen mit Depotladung Batteriekapazitäten von etwa 200-400 kWh üblich sind, ermöglicht die Ladung entlang der Strecke geringere Batteriekapazitäten von < 150 kWh.

Oberleitungsbusse können optional mit Brennstoffzelle bzw. HV-Batterie für oberleitungsfreie Teilstrecken ausgestattet sein. Die Nachladung der HV-Batterie kann dabei während der Fahrt am Fahrdrat erfolgen oder im Depot. Die HV-Batterien sind jedoch meist recht klein dimensioniert⁹.

BZ-Fahrzeuge verfügen typischerweise über eine kleine Batterie (ca. 30 kWh) zur Zwischenspeicherung des erzeugten Stroms und eine Tankgröße von 40 kg, die meist modular, z. B. in -5-7,5-kg-Schritten¹⁰, erweiterbar ist. Um die notwendige Energie für den Elektromotor bereitzustellen, wird eine entsprechend leistungsstarke Brennstoffzelle (ca. 80-100 kW) benötigt. Die Batterie stellt hier üblicherweise im Verbund mit der Brennstoffzelle die benötigte Antriebsenergie bereit und wird primär zur Zwischenspeicherung des erzeugten Stroms aus der Brennstoffzelle bzw. durch Rekuperation, z. B. beim Bremsen, genutzt. Für sie ist üblicherweise keine eigene stationäre Ladeinfrastruktur notwendig.

Im BZ-REX-Fahrzeug ist die Batterie die Hauptquelle zur Bereitstellung der Antriebsenergie. Die BZ dient primär zum kontinuierlichen Nachladen der HV-Batterie im Betrieb. Durch die leistungsstarke Batterie (Basis ist ein klassisches BEV) kann eine etwas leistungsärmere Brennstoffzelle (z. B. 30-40 kW) verwendet werden. Details zur genannten erzielbaren Reichweite werden im nächsten Kapitel erläutert.

Tabelle 4-2 | Batterie- und Tankkapazitäten¹¹ sowie Leistungsdaten „emissionsfreier Busse“ (12-m-Solofahrzeug) (Sphera)

	BEV	O-Bus	BZ-REX	BZ
Ort der Energiezufuhr	Depot	Strecke	Depot	Depot
Kapazität HV-Batterie	200-480 kWh	< 150 kWh	250 kWh	30 kWh
Kapazität H ₂ -Tank	-	-	25 kg H ₂	40 kg H ₂
Leistung Brennstoffzelle	-	-	30 kW	100 kW
Erzielbare Reichweite	100-230 km ¹²	60-100 km ¹³	340-420 km	

8 Der BZ-Rex befindet sich in der Erprobung (Solaris-Fahrzeuge in Hamburg) bzw. wird aktuell beispielsweise von EvoBus entwickelt. Da aktuell kein Bus mit H₂-Verbrennungsmotor fahrfähig ist, ist diese Antriebstechnologie aufgrund ihres derzeitigen Entwicklungsstatus noch nicht mit in der Tabelle aufgeführt.

9 Die Firma Hess liefert beispielsweise Obusse mit 27-kWh-Batteriekapazität an die Stadt Salzburg. Solaris lieferte 10 Obusse mit Brennstoffzelle, die eine Reichweite von bis zu 100 Kilometer ermöglicht, an die lettische Hauptstadt Riga (electrive, 2019).

10 Ungefähre Kapazität eines H₂-Speicherbehälters mit rund 200-300-l-Volumen und einem Speicherdruck von 350 bar.

11 Als Richtwert kann angenommen werden, dass ca. 80 Prozent der nominellen Batteriekapazität und ca. 90 Prozent der nominellen H₂-Tankkapazität im Betrieb genutzt werden können.

12 Die Reichweite des BEV hängt dabei wesentlich vom gewählten Heizungssystem für Fahrgastraum und Fahrerarbeitsplatz ab (siehe nächstes Kapitel). Wird rein elektrisch geheizt, kann sich die Reichweite von BEV an Tagen mit Außentemperaturen von < 0°C durchaus mehr als halbieren.

13 zwischen den Ladevorgängen

4.2 Reichweite und Energiebedarf

Grundsätzlich ist die Reichweite emissionsfreier Fahrzeuge aktuell geringer als die konventioneller Dieselfahrzeuge, was hauptsächlich auf die Energiedichte der alternativen Energieträger zurückzuführen ist. In einem klassischen Dieselfahrzeug werden aktuell – je nach Konfiguration – etwa 200l Diesel getankt. Dies entspricht einem Energieäquivalent von 2-3.000 kWh. Bei einem beispielhaften Verbrauch von 36 l/100 Kilometer kommt der Bus ca. 560 Kilometer weit.

Bei batterieelektrischen Fahrzeugen ist zu berücksichtigen, dass die angegebene Batteriekapazität die nominelle Energiekapazität der Batterie wiedergibt. Diese wird im Sinne einer möglichst langen Haltbarkeit der Batterie üblicherweise nur bis zu 80 Prozent¹⁴ ausgenutzt, außerdem ist zu berücksichtigen, dass eine HV-Batterie mit der Zeit und fortgesetztem Betrieb altert. Man spricht hier von kalendarischer Alterung und betrieblicher Alterung (eingeschränkte Zyklenfestigkeit). Das Lebensdauerende einer Batterie gilt als erreicht, wenn die Batterie nur noch 80 Prozent der ursprünglichen nominellen Kapazität aufweist, aktuell liegt die Lebensdauererwartung für HV-Batterien bei 6-8 Jahren, abhängig von der eingesetzten Batterietechnologie und der jeweiligen Nutzungsintensität. Für den Betreiber ist es daher zielführend, dass er zur überschlüssigen Ermittlung der ihm auch am Ende der Lebensdauer der HV-Batterie noch sicher zur Verfügung stehenden Energiemenge (auch End-of-Life-(EoL)-Kapazität genannt) die nominelle Batteriekapazität jeweils mit dem Faktor 0,8 zu multiplizieren. Insgesamt ist die vom Hersteller angegebene (nominelle) Energiekapazität daher mit dem Faktor 0,64 (= 0,8 x 0,8) zu multiplizieren.

So ergibt sich bei einer nominellen Batteriekapazität von 200 kWh bzw. 400 kWh eine voraussichtliche Energiemenge von ca. 130 bzw. 260 kWh, die am Lebensende der Batterie gesichert zur Verfügung steht. Bei einem beispielhaften Verbrauch von 1,2 kWh/km ergibt sich damit eine EoL-Reichweite von knapp 110 bzw. ca. 215 Kilometer¹⁵.

Wasserstoffbetriebene Fahrzeuge speichern gasförmigen Wasserstoff in komprimierter Form bei 350 bar. Bei einer Tankkapazität von 40 Kilogramm und einer Dichte von ca. 24 kg H₂/m³ (bei 15°C) wird ein Tankvolumen von ca. 1700 Liter benötigt, das mittels mehrerer auf dem Busdach montierten Druckgasflaschen bereitgestellt wird. Die einzelnen Druckgasbehälter verfügen dabei

üblicherweise über ein Volumen von 210 bis 365 Liter, d. h., es werden 4-8 Druckgasflaschen auf dem Dach installiert. Da in den Druckgasflaschen üblicherweise ein Restdruck von ca. 20 bar verbleiben muss, sind ca. 90-95 Prozent der gespeicherten Wasserstoffmenge nutzbar. Bei einer Speicherkapazität von 40 Kilogramm und einem Energieinhalt des Wasserstoffs von 33,3 kWh/kg entspricht das einer nutzbaren Energiemenge von ca. 1240 kWh. Für einen beispielhaften mittleren Verbrauch von 9,0 kg/100 km ergibt sich somit für einen 12-m-Bus mit 40-kg-H₂-Speicherkapazität eine Reichweite von ca. 410 Kilometer. Analog zur HV-Batterie der batterieelektrischen Fahrzeuge treten auch bei der Brennstoffzelle Alterungseffekte auf, die sich auf die Effizienz und damit auf den Wasserstoffverbrauch auswirken. Für die neuste Brennstoffzellengeneration wird eine Lebensdauer von bis zu 30 000 Stunden erwartet, was je nach Einsatzprofil der Fahrzeuge etwa 8-10 Jahren entspricht.

Neben der gespeicherten Energiemenge haben weitere Parameter entscheidenden Einfluss auf den Energieverbrauch und damit die Reichweite der Fahrzeuge. In den folgenden Abschnitten wird im Detail auf den Einfluss der Streckencharakteristika und der klimatischen Bedingungen eingegangen. Nicht unwesentlich ist weiterhin der Einfluss des Fahrverhaltens auf den Verbrauch. Durch entsprechende Schulung der Fahrer und Sensibilisierung, insbesondere hinsichtlich der Nutzung der Rekuperation, kann hier positiv Einfluss genommen werden.

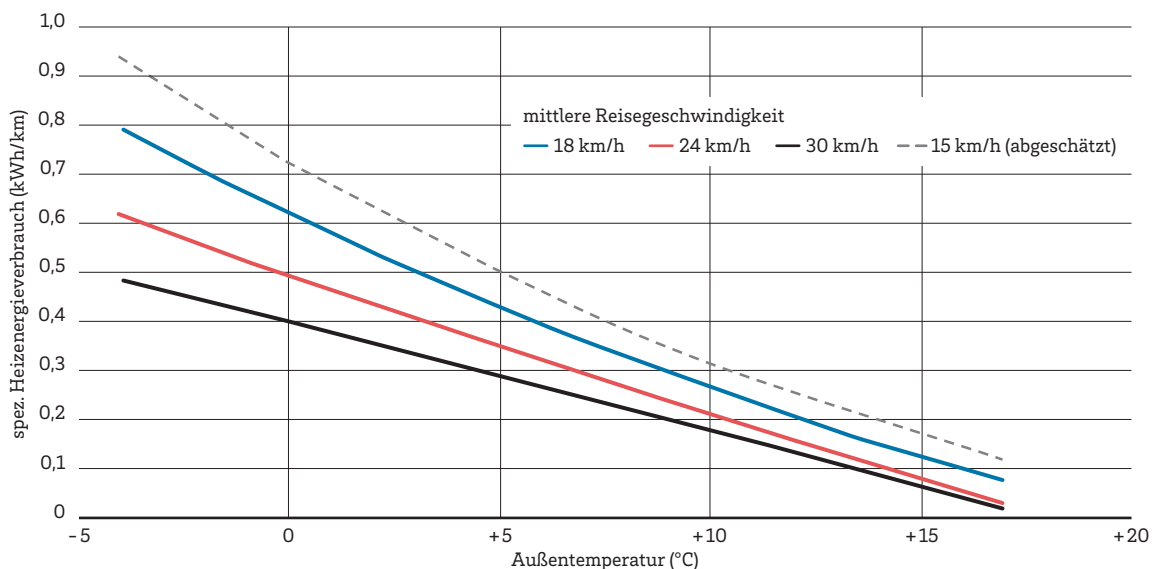
Streckencharakteristika:

Die Streckencharakteristik (z. B. innerstädtischer oder Überlandbetrieb) und damit die Durchschnittsgeschwindigkeit des Umlaufs beeinflussen unmittelbar den Energiebedarf. Tendenziell sinkt mit steigender Durchschnittsgeschwindigkeit der spezifische Verbrauch. SORT3-Umläufe mit einer mittleren Geschwindigkeit um 25 km/h weisen typischerweise einen geringeren spezifischen Energieverbrauch (kWh/km) auf als SORT1- (Ø Geschwindigkeiten um 12 km/h)- oder SORT2- (Ø Geschwindigkeiten um 18 km/h)-Umläufe. Diese grundsätzlichen Abhängigkeiten gelten sowohl für konventionelle als auch für emissionsfreie Fahrzeuge.

Anders ist jedoch der Einfluss der Streckentopografie zu bewerten. Während bei Bussen mit konventionellem, verbrennungsmotorischem Antrieb eine starke Abhängigkeit des Verbrauchs von der Streckentopografie zu beobachten ist, fällt dieser Einfluss bei Bussen mit elektrischem Antrieb tendenziell geringer aus. Dies liegt daran, dass im

14 Die nutzbare Batteriekapazität ist abhängig von der verbauten Zellchemie. Bei Nickel-Mangan-Cobalt-Batterien (NMC) kann als Richtwert ca. 65 Prozent angenommen werden, bei Lithium-Eisenphosphat-Batterien (LFP) bis zu 90 Prozent.

15 Die tatsächliche Stromabnahme an der Ladesäule ist aufgrund der Ladeverluste noch um etwa 5-10 Prozent höher.



Gegensatz zu konventionellen Fahrzeugen, Fahrzeuge mit Elektromotor beim Bremsen Energie mittels Rekuperation zurückgewinnen können und diese im vorhandenen Stromspeicher zwischenspeichern können (Arbeitsgruppe Innovative Antriebe Bus, 2016).

Jahreszeiten und klimatische Bedingungen: Deutlichere Unterschiede gibt es jedoch beim Einfluss der klimatischen Bedingungen auf die Reichweite emissionsfreier Fahrzeuge. Durch den Wegfall der Motorabwärme muss deutlich mehr Energie für das Heizen der Fahrzeuge mit E-Antrieb bereitgestellt werden. Im Rahmen der von BMVI und BMU initiierten Arbeitsgruppe „Innovative Antriebe Bus“ wurde der Energiebedarf batterieelektrischer Fahrzeuge im Jahresverlauf aufgenommen. Dabei wurden Energieverbräuche von 1,2-2,8 kWh/km (12-m-Solofahrzeug, alle Fahrzeuge mit elektrischer Heizung, netzseitig gemessen) ermittelt (Arbeitsgruppe Innovative Antriebe Bus, 2016; Faltenbacher, 2016b). Ohne Einsatz der Heizung und Klimatisierung sind Energieverbräuche am unteren Ende des Bereichs realistisch. Bei kompletter elektrischer Heizung bzw. Klimatisierung kann sich der Energiebedarf um bis zu 100 Prozent erhöhen. Abbildung 4-1 zeigt den gemessenen Energieverbrauch für das Heizen eines beispielhaften Fahrzeuges in Abhängigkeit der Außentemperatur und der mittleren Reisegeschwindigkeit.

Bei Temperaturen von -5°C und 18 km/h mittlerer Reisegeschwindigkeit ergibt sich im Beispiel ein Mehrbedarf von etwa 0,8 kWh/km, was in etwa im mittleren Bereich der oben genannten Verbräuche liegt¹⁶. Es wurden auch bereits heizungsbedingte Mehrverbräuche von über 1 kWh/km bei einzelnen Verkehrsbetrieben beobachtet. Bei einer

typischen Batteriekapazität von 250 kWh für Fahrzeuge mit Übernachtladung ist somit je nach Jahreszeit eine EoL-Reichweite von etwa 70-150 Kilometer möglich (120-230 km bei 400-kWh-Batteriekapazität). Das wesentliche Kriterium für die Höhe des Mehrverbrauchs ist die Art der Heizung (z. B. Widerstandsheizung oder Wärmepumpe). Um die Reichweite zu erhöhen und den Einfluss der klimatischen Bedingungen zu reduzieren, kann beispielsweise ein mit Diesel betriebener Zusatzheizer eingesetzt werden. Allerdings ist der Betrieb des batterieelektrischen Busses dann nicht mehr lokal emissionsfrei, im Sinne der CVD gilt das Fahrzeug aber weiterhin als emissionsfreies Fahrzeug.

Fahrzeuge mit Gelegenheitsladung verfügen üblicherweise über kleinere Batterien und werden im laufenden Betrieb – beispielsweise an den Endhaltestellen der Linie, wo sowieso eine gewisse Standzeit eingeplant ist – nachgeladen. Bei der in Tabelle 4 2 genannten Batteriekapazität ergibt sich eine theoretische Reichweite von 45-90 Kilometern zwischen einzelnen Ladevorgängen.

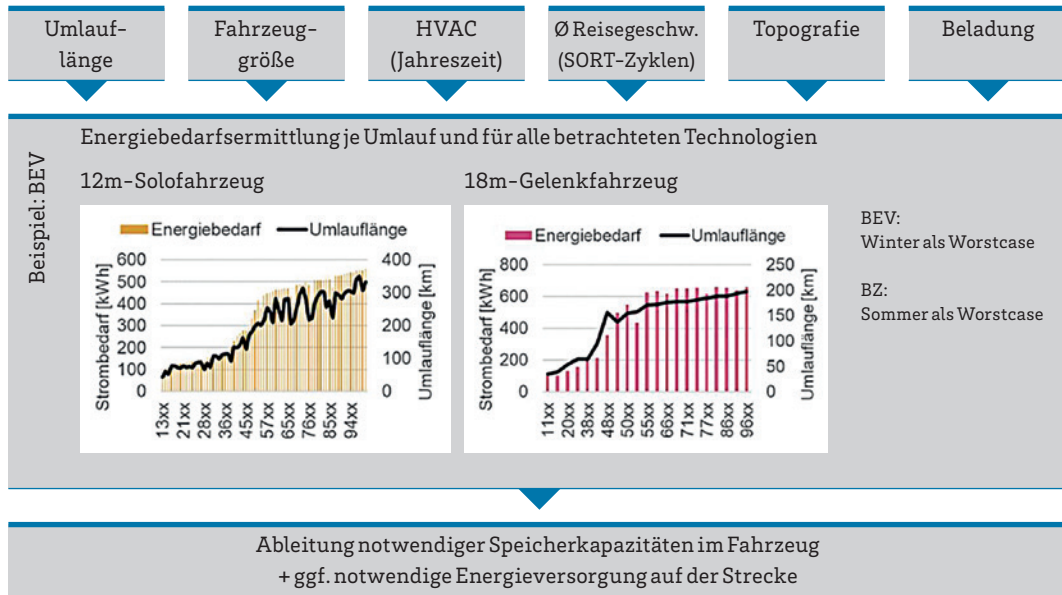
Bei Brennstoffzellenfahrzeugen ist der Energiebedarf der Heizung etwas weniger kritisch, da die entfallene Motorabwärme teilweise durch die Abwärme der Brennstoffzelle kompensiert werden kann¹⁷. Der Energiebedarf von BZ-Fahrzeugen beträgt im Schnitt zwischen 8,5 und 10,5 kg H₂/100 km (Kupferschmid & Faltenbacher, 2018). Somit sind bei einer Tankgröße von 40 Kilogramm (Tabelle 4-2) Reichweiten von 350-440 Kilometer möglich.

Der Energiebedarf des batterieelektrischen Fahrzeugs mit Brennstoffzelle als Range Extender

16 Unterstellt wurde ein Wirkungsgrad von annähernd 100 Prozent für die Umwandlung von elektrischer in Wärmeenergie, was für elektrische Heizer zutreffend ist.

17 Bei der Erzeugung von Strom in einer Brennstoffzelle entsteht ebenfalls Wärme, jedoch deutlich weniger als beim Betrieb eines konventionellen Verbrennungsmotors.

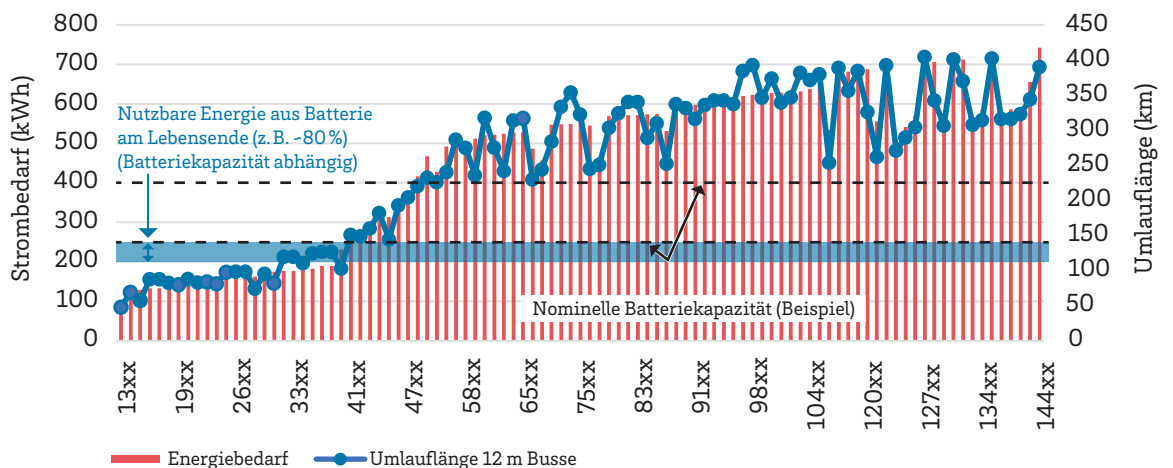
4-2 | Schematische Darstellung der Energiebedarfs-ermittlung (Sphera)



(BZ-REX) ist abhängig vom Energiemanagement des Fahrzeugs. So kann – bei bekannten Routenverlauf – beispielsweise die effizientere Strombereitstellungsform (aus HV-Batterie) primär genutzt werden und nur bei Bedarf zusätzlich Wasserstoff in der Brennstoffzelle eingesetzt werden. Bei längeren oder nicht planbaren Umläufen kommen beide Energieträger (elektrische Energie aus der Batterie und Wasserstoff) zum Einsatz. Somit ergibt sich ein stark fahrstreckenabhängiger, spezifischer Strom- bzw. Wasserstoffverbrauch. Eine pauschale Aussage über den Energieverbrauch der BZ-REX-Fahrzeuge kann aufgrund der Vielzahl an Einflussfaktoren und des großen Einflusses des Energiemanagements nicht ohne weitere einsatzspezifische Informationen seriös getätigt werden¹⁸. Grundsätzlich können jedoch Reichweiten ähnlich der reinen

Wasserstofffahrzeuge erwartet werden. Um bewerten zu können, welche Fahrzeug- und Energieversorgungstechnologie (H₂-Betankung, Depotladung, Streckenladung, Oberleitung etc.) oder auch welcher Mix aus den genannten Fahrzeug- und Energieversorgungstechnologien für das jeweilige Unternehmen die richtige Wahl ist, ist eine dezidierte Analyse des Energiebedarfs der einzelnen Umläufe unabdingbar (Abbildung 4-3). Auf Basis der genannten Einflussfaktoren Umlauf-länge, Fahrzeugtyp (und -größe), klimatische Randbedingungen, Streckencharakteristika (Topografie + Durchschnittsgeschwindigkeit) und Fahrzeugbeladung kann somit beurteilt werden, welche Technologien grundsätzlich für den jeweiligen Verkehrsbetrieb mit seinen spezifischen Randbedingungen infrage kommen.

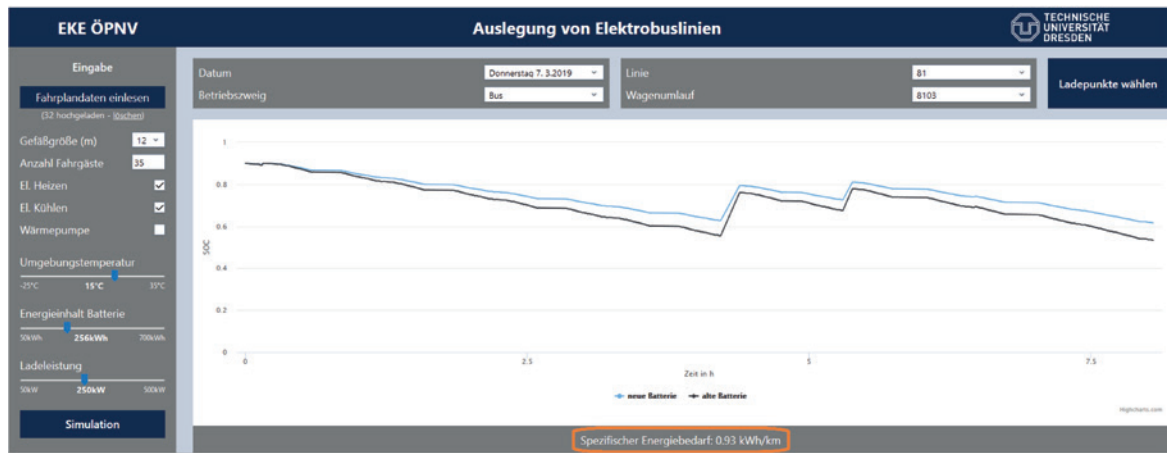
4-3 | Exemplarische Energiebedarfs-analyse verschiedener Umläufe (Sphera)



18 Unterstellt wurde ein Wirkungsgrad von annähernd 100 Prozent für die Umwandlung von elektrischer in Wärmeenergie, was für elektrische Heizer zutreffend ist.

Zur überschlägigen Ermittlung des linien- bzw. umlaufspezifischen Energiebedarfs kann beispielsweise das Simulationstool EKE-ÖPNV der Technischen Universität Dresden verwendet werden, siehe Abbildung 4-4. Ebenfalls bieten dies die Fahrzeughersteller und andere Dienstleister an.

4-4 | Energiebedarfsanalyse
TU Dresden



Um die Vorgaben zu emissionsfreien Fahrzeugen gemäß der Clean Vehicles Directive umsetzen zu können, gilt es für die Busbetriebe im Hinblick auf die Energieversorgung und die damit eingehende Infrastruktur umzudenken. Die (meist) vorhandene Dieseltankstelle auf dem Betriebshof ist um eine Versorgungsinfrastruktur für Strom und/oder Wasserstoff zu ergänzen. In den folgenden Abschnitten wird im Detail auf die verschiedenen Energieversorgungskonzepte mit ihren unterschiedlichen Ausprägungen eingegangen.

5.1 Energieversorgungskonzepte

Grundsätzlich ist die Infrastruktur für die Versorgung der Busse wesentlich abhängig von der gewählten Antriebstechnologie der Busse und des damit verbundenen Energieträgers.

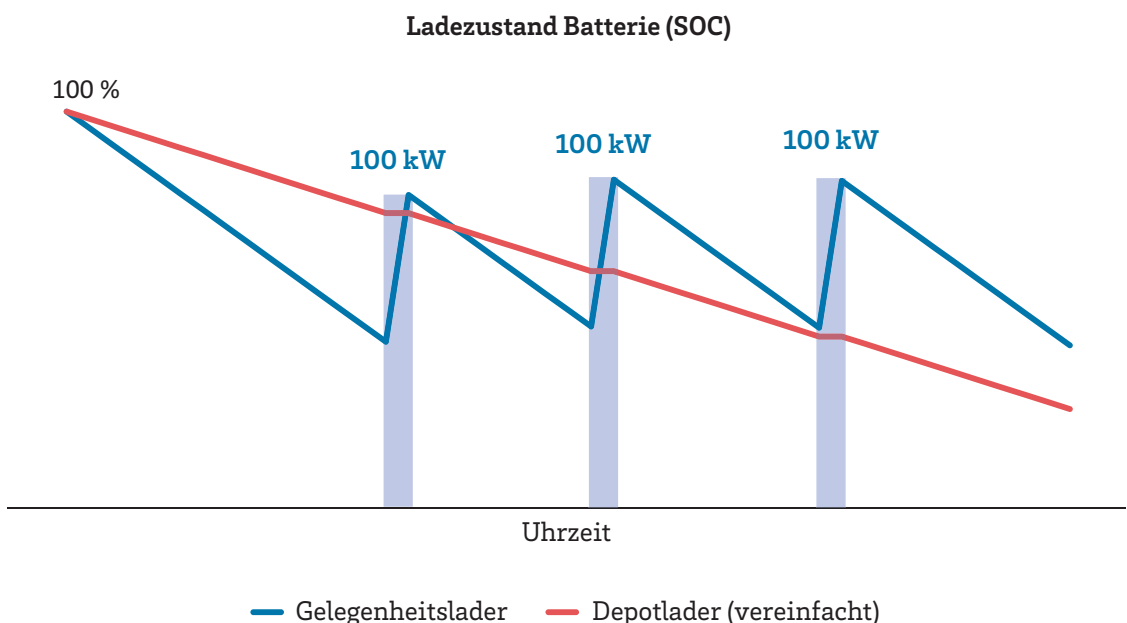
Stromversorgung für batterieelektrische und Oberleitungshybridbusse:

Für die Versorgung dieser Fahrzeuge mit Strom lassen sich drei grundlegende Konzepte unterscheiden:

- Overnight-Charging: Übernachtladung im Depot
- Opportunity-Charging: Gelegenheitsladung (meist entlang der Strecke)
- In-Motion-Charging: kontinuierliche Stromversorgung

Beim In-Motion-Charging wird der Strom während der Fahrt dem Fahrzeug zugeführt. Dies findet im Prinzip nur bei Oberleitungsbussen Anwendung. Im „Standardbetrieb“ des Oberleitungsbusses unter der Oberleitung findet sonst kein Ladevorgang statt, da der Strom direkt dem Abnehmer, d. h. dem Elektromotor, zugeführt wird. Unter Opportunity-Charging (Gelegenheitsladung) versteht man das Nachladen der Fahrzeuge entlang der Strecke an dezidierten Ladestationen, beispielsweise an den Linienendpunkten. In diesem Fall werden die Fahrzeuge meist noch zusätzlich über Nacht (Over-night-Charging) im Depot geladen. Beim reinen Overnight-Charging werden die Busse nur im Depot geladen. Je nach Stromversorgungskonzept müssen entsprechend andere Ladeleistungen vorgehalten werden, um in der zur Verfügung stehenden Zeit genügend Energie in das Fahrzeug übertragen zu können. Abbildung 5-2 veranschaulicht beispielhaft den Verlauf des Ladezustands (State-of-Charge, SOC) der HV-Batterie bei Gelegenheits- und Übernachtslader. Weitere Details zum Thema „Nachladen“ finden sich in Kapitel 5.2.

5-1 | Schematische Darstellung des Ladezustands der Batterie für Gelegenheits- und Depotlader über den Tag (Sphera/VDV)



Wasserstoffversorgung:

Die Versorgung von wasserstoffbetriebenen Bussen erfolgt über eine Wasserstofftankstelle. Der Tankvorgang an sich ähnelt dem einer Erdgasbetankung. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass der gasförmige Wasserstoff in den Tanks der Tankstelle einen höheren Druck aufweist als der im Fahrzeugtank. Durch diesen Druckunterschied strömt der Wasserstoff in das Fahrzeug über und wird nicht – wie bei einer Dieselbetankung – aktiv in das Fahrzeug gepumpt. Hier lassen sich im Wesentlichen zwei Konzepte unterscheiden:

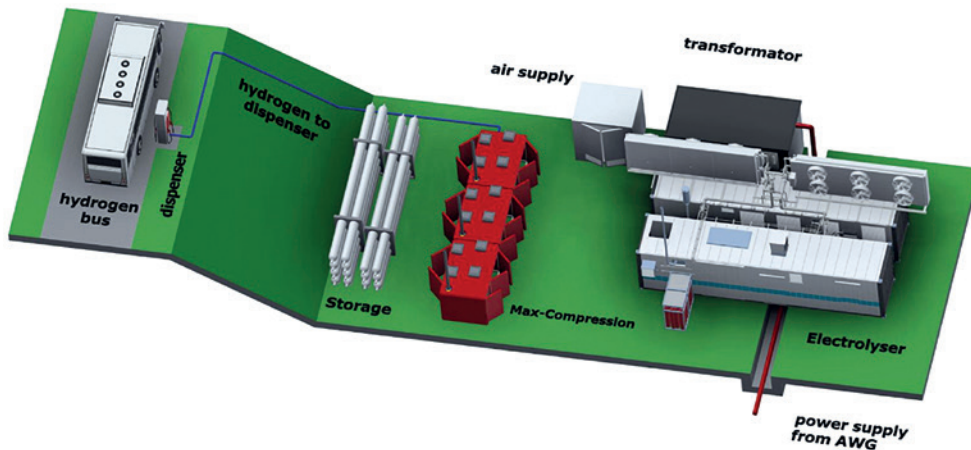
- Fast-Filling: Klassischer Betankungsvorgang mit Komplettbetankung des Busses innerhalb einiger Minuten
- Slow-Filling: Betankung der Busse über Nacht

Das Fast-Filling entspricht im Prinzip einem klassischen Tankvorgang, der auch zeitlich mit dem einer Dieselbetankung in etwa vergleichbar ist. In Abbildung 5-2 ist die Umsetzung einer Fast-Filling Station inklusive Elektrolyseur (Vor-Ort-Erzeugung von Wasserstoff) bei den Wuppertaler Stadtwerken dargestellt.

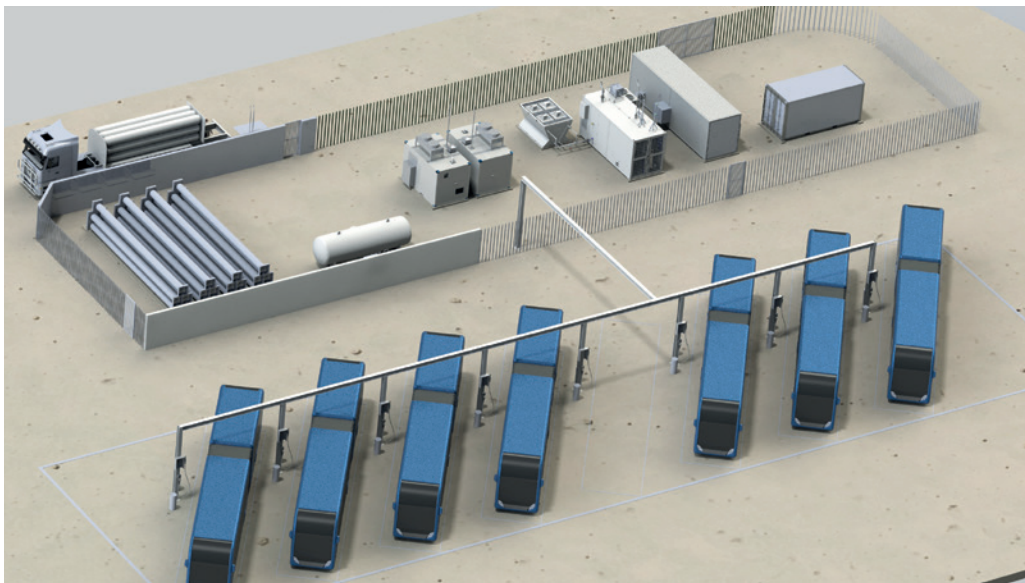
Beim Slow-Filling werden die Fahrzeuge über Nacht an die Tankstelle angeschlossen. Die lange Zeit für die Betankung ermöglicht eine technisch einfachere Tankstelle. Abbildung 5-3 zeigt eine solche Slow-Filling-Lösung, wie sie im Rahmen des FCH-JU-kogeförderten Projektes JIVE 2 für die H₂-Versorgung von acht BZ-Gelenkbussen umgesetzt wird.

Das übliche Betankungskonzept ist das Fast-Filling-Verfahren, entsprechend liegt der Fokus dieses Leitfadens auf diesem Verfahren.

5-2 | Fast-Filling-Lösung in Wuppertal inklusive Elektrolyser (WSW)



5-3 | Slow-Filling-Lösung im französischen Pau (ENGIE/GNVERT und ITM)



5.2 Lade- und Stromversorgungsinfrastruktur

Die Versorgung batterieelektrischer Busse mit Energie (Strom) unterscheidet sich fundamental von der Versorgung von Dieselnissen. Die notwendige Energie kann nicht wie bisher über Tanklaster angeliefert werden und vor Ort in Dieseltanks bevorratet werden, sondern muss über entsprechende Übertragungsinfrastruktur (Stromnetz) unmittelbar zum Ort und zum Zeitpunkt der Ladung gebracht werden. Der Anschluss erfolgt in aller Regel über das Mittelspannungsnetz (10 oder 20 kV). Ab einem Leistungsbedarf von etwa 10 MVA kann, je nach lokaler Netzsituation, auch ein Anschluss an das vorgelagerte Hochspannungsnetz (i. d. R. 110 kV) erforderlich sein. Sofern das Verkehrsunternehmen über Straßenbahnen verfügt, ist auch ein Anschluss an das üblicherweise mit 750 V betriebene Bahnstromnetz denkbar (siehe auch VDV-Schrift 260).

Dynamische Ladetechnik: Oberleitungsbusse:

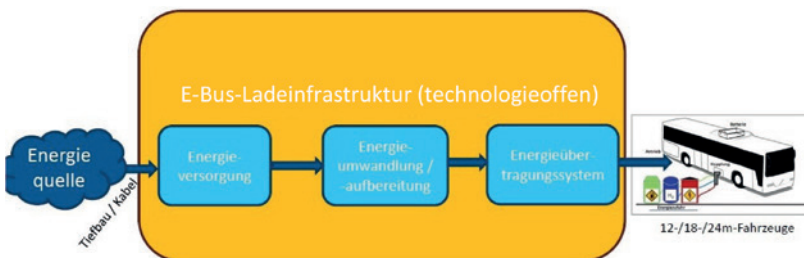
Bei der dynamischen Ladetechnik wird das Fahrzeug über einen Stromabnehmer mit einer Oberleitung verbunden, wodurch Strom während der Fahrt aufgenommen werden kann.

In Deutschland verfügen aktuell nur noch drei Städte (von insgesamt 70 Mitte der 50er-Jahre (DLR, 2015)) über ein Oberleitungssystem für Busse:

- Eberswalde
- Esslingen am Neckar
- Solingen



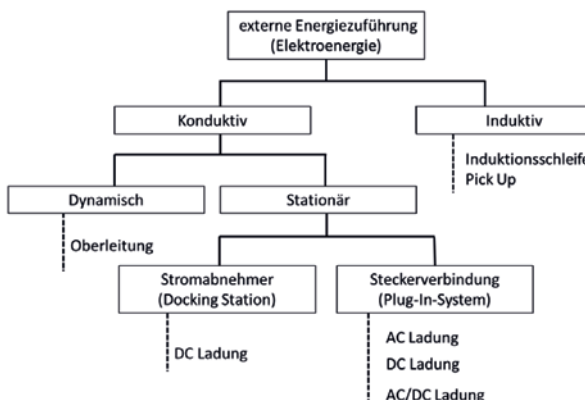
5-6 | Oberleitungsbus von Solaris in Solingen (oben), Stromabnehmer eines Obus (unten)



5-4 | Übersicht zur Einordnung der Ladeinfrastruktur im Batterie-Elektrobussystem (VDV-Schrift 260)

Der im Netz fließende Gleichstrom (DC) wird im ersten Schritt über entsprechende Energiewandler auf das Spannungsniveau des Fahrzeugs (z. B. 400 V) umgewandelt. Anschließend erfolgt die Ladung des Fahrzeugs je nach Stromübertragungssystem entweder mit Gleich- oder Wechselstrom (AC, dann mit integriertem Wechselrichter).

Abbildung 5-5 gibt einen Überblick über mögliche Stromübertragungssysteme für E-Busse (ohne BZ). Bei der induktiven Energiezuführung erfolgt die Energieübertragung kontaktlos über eine Induktionsschleife, die im Boden verankert ist. Diese Technologie hat sich bisher nicht durchgesetzt und wird daher hier nicht weiter im Detail betrachtet. Die konduktive Ladetechnik kann zwischen stationärer und dynamischer Übertragung unterschieden werden.



5-5 | Übersicht Stromübertragungssysteme (VDV-Schrift 260)

5-7 | Fahrzeug mit Pantografen beim Ladevorgang (links: Hamburger Hochbahn, absenkender Pantograf an Ladestation; rechts: Flughafen Amsterdam, fahrzeugseitig montierter Pantograf) (Hamburger Hochbahn, VDL Bus&Coach)



**Statische Ladetechnik:
Depot- und Gelegenheitslader:**

Bei der Ladung der Fahrzeuge im Depot oder an dezidierten Ladestationen entlang der Strecke, kommen konduktive, statische Ladetechniken zum Einsatz. Hier werden grundsätzlich zwei Arten unterschieden:

- Stromabnehmer (Pantograf)
- Ladekabel mit Stecker

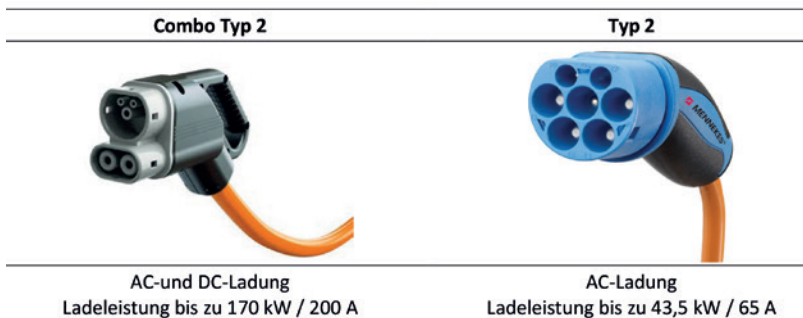
Pantografen sind vergleichbar mit Stromabnehmern bei Straßenbahnen mit dem Unterschied, dass sie nicht permanent mit der Stromquelle verbunden sind. Pantografen werden mit Gleichstrom betrieben und können entweder auf dem Fahrzeugdach oder an der Ladestation montiert sein. Wenn das Fahrzeug an der Ladestation ankommt, wird es über den Pantografen mit ihr verbunden und kann geladen werden.

Pantografen bieten sich insbesondere dann an, wenn Platzeinschränkungen in der Abstellung vorhanden sind oder wenn das Fahrzeug an der Strecke nachgeladen werden muss (Gelegenheitslader). Hier besteht die Möglichkeit, die Anbindung des Fahrzeugs an die Ladestation automatisiert (bzw. per Knopfdruck im Fahrzeug) ablaufen zu lassen. Die Ladeleistungen gängiger Pantografen erreichen

aktuell bis zu 450 kW¹⁹. Nachteilig sind die im Vergleich zu Ladekabeln höheren Investitionskosten für die Technologie. Typischerweise werden zusätzlich zu den Ladestationen entlang der Strecke (hohe Ladeleistung aufgrund kurzer Standzeit) Ladestationen im Depot aufgebaut, um die Fahrzeuge über Nacht vollständig wieder aufzuladen. Hier macht es Sinn, aufgrund der langen Standzeiten geringere Ladeleistungen zu verwenden und somit die Aufwendungen für den Netzanschluss zu reduzieren. Für Ladekabel mit Stecker gibt es unterschiedliche Systeme. Sie unterscheiden sich primär durch den übertragenen Strom (Wechsel- bzw. Gleichstrom) sowie die dadurch möglichen Ladeleistung. Abbildung 5-8 zeigt die zwei wichtigsten Steckertypen. Der Combo-Typ-2-Stecker wird auch als CCS-Stecker (Combined Charging System) bezeichnet und deckt sowohl die Gleich- als auch die Wechselstromladung ab. Der CCS-Stecker ist in der IEC 62196-3 genormt und von der Europäischen Union als einheitlicher Standard für öffentliche Ladesäulen festgelegt worden. Im Busbereich ist er zudem aktuell der am weitesten verbreitete Steckertyp in Europa²⁰. Über die DC-Schnittstelle kann eine Ladeleistung von bis zu 170 kW abgebildet werden. (VDV-Schrift 260)

Diskutiert wird neben der Ladung der Batterien über Pantografen bzw. Ladekabel auch der Tausch der Batterien über entsprechende Anlagen. Beispiele für die Umsetzung sind aktuell jedoch hauptsächlich in China zu finden, werden aber auch dort kaum noch angewandt.

5-8 | Steckertypen für Wechselstromübertragung (AC, rechts) bzw. Gleich- und Wechselstromübertragung (AC/DC, links) (VDV-Schrift 260)



19 Als Faustregel gilt, dass Batterien – je nach Technologie – etwa mit maximal 2C (zweifache Batteriekapazität) aufgeladen werden können, schnellladefähige Batterien wie z. B. LTO-Batterien können sogar mit bis zu 5C geladen werden. Für die Ladeleistung von 450 kW sollte die Batterie somit mindestens 225 kWh aufweisen. Gelegenheitslader mit einer derart großen Batteriekapazität sind jedoch eher untypisch (vgl. Tabelle 4-2).

20 Das aus Japan stammende CHAdeMO-System ist aktuell in Europa nicht in gleichem Maße vertreten, ist jedoch prinzipiell ebenfalls geeignet.

5.3 Wasserstoffinfrastruktur

Wie bereits in Abschnitt 4.1 erläutert, unterscheidet sich die Energieversorgung der Wasserstofffahrzeuge – im Gegensatz zu den batterieelektrischen Fahrzeugen – deutlich weniger von der Versorgung klassischer Dieselsebusse. Abbildung 5-8 zeigt den Tankvorgang an einem Wasserstofffahrzeug der RVK.



5-9 | Tankvorgang eines Brennstoffzellenfahrzeugs (SSB)

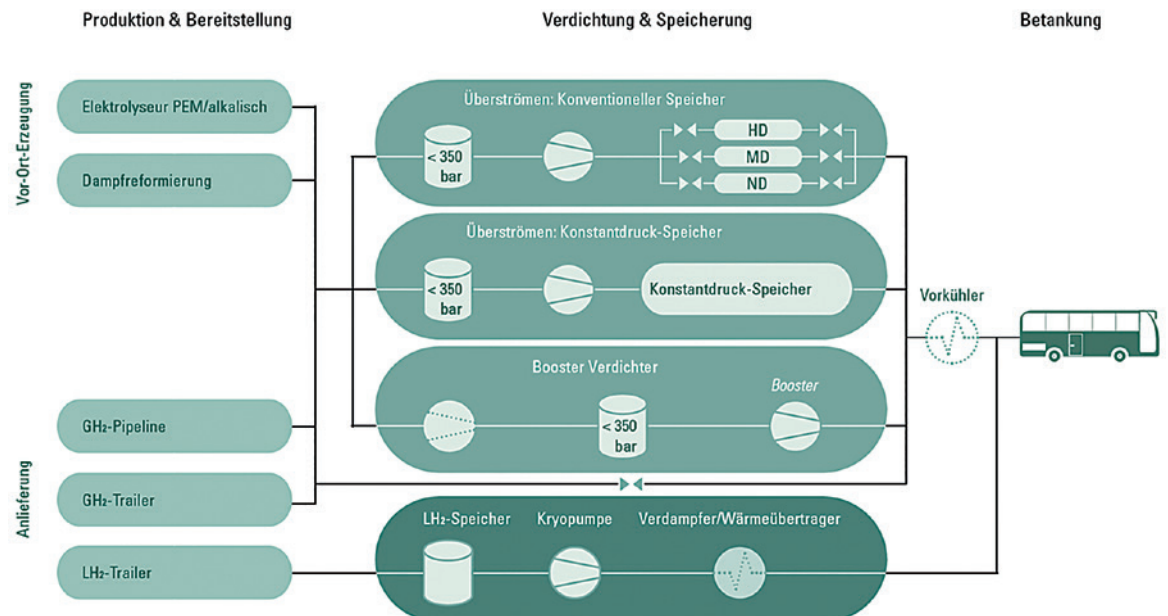
Aufgrund der geringen volumetrischen Energiedichte von Wasserstoff muss dieser jedoch auf hohen Druck verdichtet werden, um in einem definierten Speichervolumen ausreichend Energie zur Verfügung stellen zu können. Für den Tankvorgang ist dabei der Druckunterschied zwischen den Versorgungstanks der Tankstelle (Speicherdruck in Tankstelle bis zu 500 bar) und dem der Fahrzeuge (bei Bussen üblicherweise 350 bar Enddruck) entscheidend. Sofern ein ausreichender Druckunterschied vorhanden ist, kann Wasserstoff von der Tankstelle in die Tanks des Fahrzeugs überströmen. Um diesen Druckunterschied – und damit eine verlässliche Betankung – gewährleisten zu können, kommt der Auslegung der Kompressoren und Speichertanks der Tankstelle eine besondere Bedeutung zu.

Abbildung 5-10 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Wasserstofftankstelle inklusive Wasserstoffbereitstellung, Verdichtung & Speicherung und Betankung. Für die meisten Verkehrsbetriebe wird die Anlieferung des Wasserstoffs dabei entweder in gasförmiger Form bei 200-300 bar oder bei größerem Bedarf in flüssiger Form per Lkw erfolgen. Theoretisch ebenfalls möglich ist die Anbindung der Tankstelle an eine Wasserstoffpipeline. Dies macht jedoch aus wirtschaftlichen Gründen meist nur dann Sinn, wenn

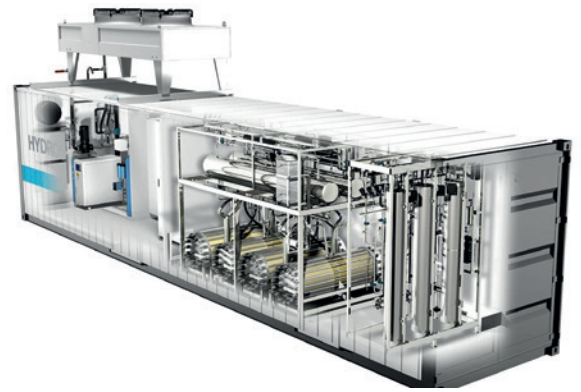
die Wasserstofferzeugung (beispielsweise in der chemischen Industrie) in unmittelbarer Nähe des Depots liegt. Eine weitere Möglichkeit ist die Erzeugung von Wasserstoff über Elektrolyse direkt vor Ort, wodurch die logistischen Aufwendungen zur Lieferung des Wasserstoffs entfallen können. Das Bereitstellungskonzept von Wasserstoff (Lieferung, Pipeline oder Vor-Ort-Erzeugung) ist im Rahmen der Technologieentscheidung zu entwickeln und bedarf einer Einzelfallbetrachtung. Zu den wesentlichen Entscheidungskriterien gehören die mögliche Logistikkette (Verfügbarkeit von Wasserstoff im Bundesgebiet siehe Textbox auf Seite 33), lokale Verfügbarkeit von EE-Stromerzeugungsanlagen, Klimaschutzanforderungen, Strompreise etc.

Abbildung 5-11 zeigt typische Komponenten einer Wasserstofftankstelle sowie einen Elektrolyseur. Die Verdichter und Speicher sowie der Elektrolyseur sind typischerweise in 20- oder 40-Fuß-Containern untergebracht.

5-10 | Prinzipskizze einer Wasserstofftankstelle inklusive Anlieferung, Verdichtung & Speicherung & Betankung (Kupferschmid & Faltenbacher)



5-11 | Links: Komponenten einer Wasserstofftankstelle: Wasserstoffspeichertank (hinten links), Verdichter eingehaust in Container (rechts) und Zapfsäule (vorne links) [Linde 2018]; Rechts: Beispiel eines Elektrolyseurs (Hydrogenics, 2016)



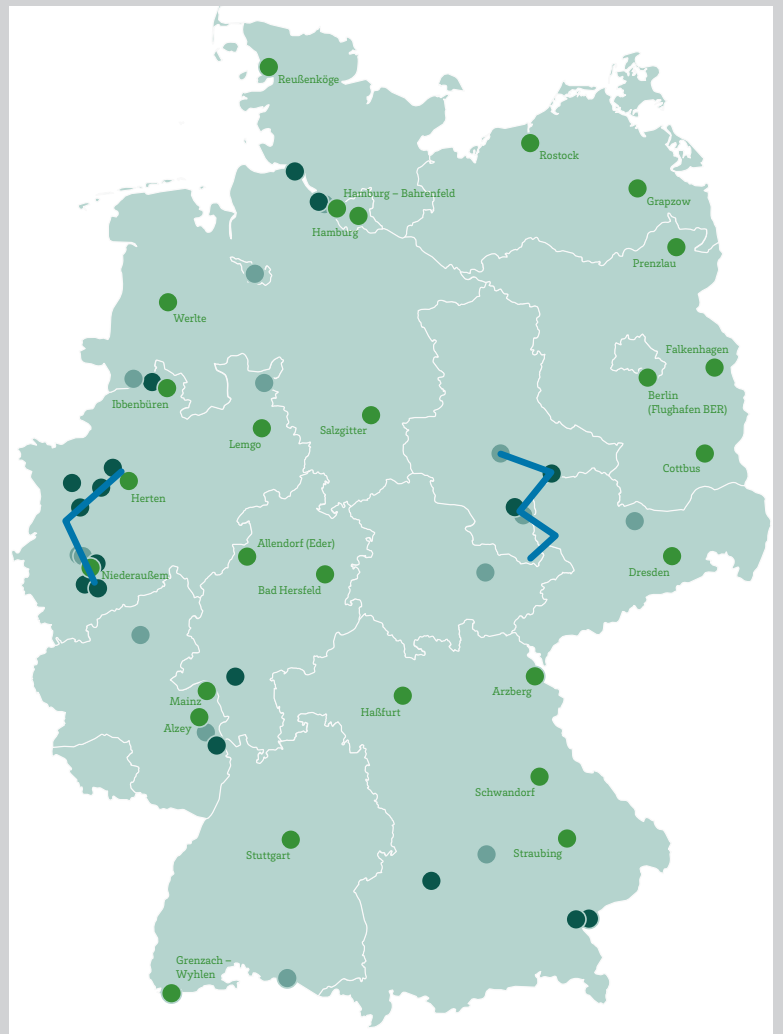
Der angelieferte bzw. selbst erzeugte Wasserstoff wird dann in aller Regel über entsprechende Kompressoren auf das genannte Speicherniveau der Tankstelle verdichtet und dort in verschiedenen Speicherbänken (Hoch-, Mittel- und Niederdruck) gespeichert. Von dort strömt der Wasserstoff in das über eine Zapfsäule angeschlossene Fahrzeug über (siehe Abbildung 5-8). Der Tankvorgang unterscheidet sich dabei in seiner Ausführung kaum vom Tankvorgang eines konventionellen Erdgasbusses.

Da es sich bei Wasserstoff um ein in bestimmten Grenzen explosives Gas handelt, müssen die wasserstoffführenden Teile der Tankstelle durch bestimmte bauliche Maßnahmen vor mechanischen Schäden geschützt werden. Weiterhin sind bestimmte Sicherheitsabstände zu Fahrwegen etc. einzuhalten sowie, sofern die Nutzung in einer Halle geplant ist, Explosionsschutz-Einrichtungen (ATEX) vorzusehen. Details hierzu können dem VdTÜV-Merkblatt 514 entnommen werden. Weiterführende Informationen zu Wasserstofftankstellen finden sich in (Kupferschmid & Faltenbacher, 2018).

Verfügbarkeit von Wasserstoff im Bundesgebiet (EY, 2016):

Die Nutzung und Herstellung von Wasserstoff erfolgt in erster Linie in der chemischen Industrie bzw. in Raffinerien sowie zunehmend auch über die Elektrolyse von Wasser zu Wasserstoff und Sauerstoff (siehe auch Kapitel 8.1.2). Die folgende Grafik gibt einen Überblick über die Wasserstoffbezugsmöglichkeiten in Deutschland. „Merchant H₂“ wird auch als Handelswasserstoff bezeichnet und steht prinzipiell Dritten zum Kauf zur Verfügung. Das bestehende H₂-Pipelinennetz beschränkt sich momentan vor allem noch auf bestehende Chemiestandorte.

Aktuelle Projekte analysieren jedoch die langfristige Erweiterung der Infrastruktur auf Bundesebene (z. B. <https://www.get-h2.de>). Weitere H₂-Projekte können über die Power-to-Gas-Plattform der deutschen Energieagentur abgefragt werden: <https://www.powertogas.info/projektkarte/>



5-12 | Wasserstoffbezugsmöglichkeiten in Deutschland (Sphera auf Basis EY)

5.4 Auslegung der Infrastruktur

Ausschlaggebend für die Dimensionierung der Energieversorgung und der dafür benötigten Lade- bzw. Tankinfrastruktur sind im Wesentlichen die folgenden Faktoren:

- Spezifischer Energiebedarf je Umlauf
- Fahrzeug- und Energieversorgungskonzept
- Flottengröße und Umstellungszeitplan
- Standzeiten der Fahrzeuge zur Energieversorgung im Depot bzw. entlang der Strecke
- Flächenverfügbarkeit
- Reserven der lokalen Versorgungsnetze
- Anforderungen an Versorgungssicherheit und Flexibilität

Diese Faktoren beeinflussen sich jeweils gegenseitig und sollten daher weniger als einzelne Parameter, sondern mehr als Systemgrenzen verstanden werden.

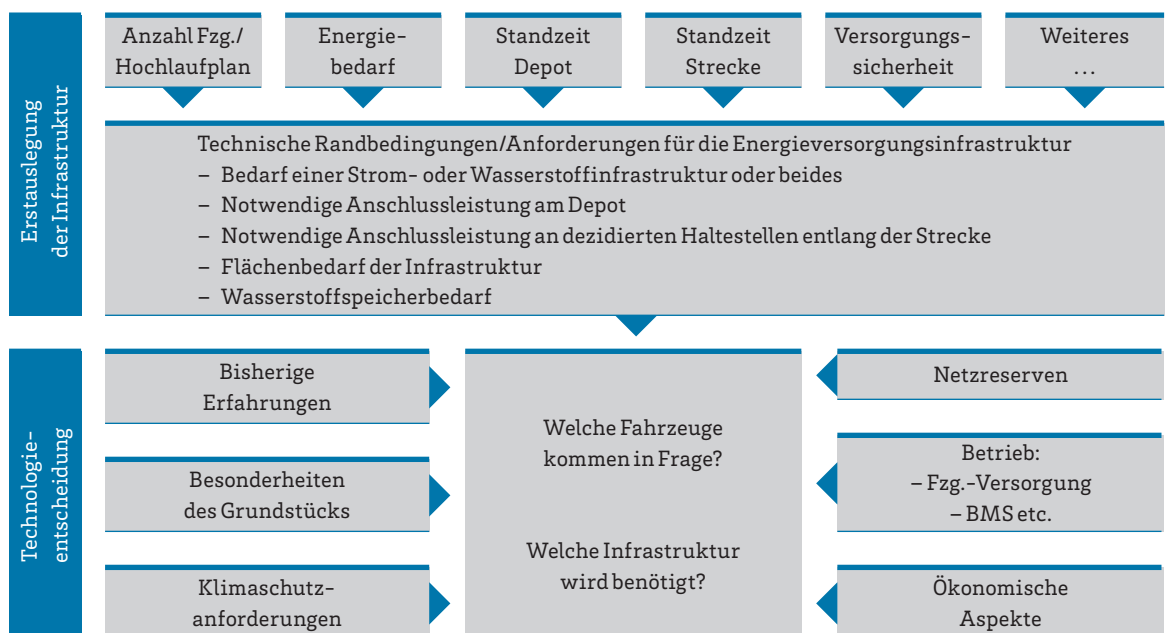
Im Vergleich zu konventionellen Dieselnissen ergeben sich durch die Implementierung von lokal emissionsfreien Fahrzeugen wesentlich komplexere Randbedingungen in puncto Infrastruktur. Abbildung 5-12 liefert einen Ansatz, wie mögliche Konzepte strukturiert erarbeitet werden können. Der Energiebedarf der Umläufe ist der Haupteinflussfaktor für den gesamten Betrieb emissionsfreier Fahrzeuge. Die durchgeführte Energiebedarfsermittlung der Einzelumläufe (siehe Kapitel 4.2) ergibt kumuliert den Gesamtbedarf der betrachteten Flotte. Ist der Energiebedarf der bestehenden und (ggf. geplanten) Umläufe bekannt,

kann abgeprüft werden, welche Umläufe mit welchem Fahrzeugkonzept ohne zwischenzeitliches Nachladen bzw. erneutes Tanken bedient werden können. Häufig ergibt sich an dieser Stelle ein erstes Hindernis für die Verkehrsbetriebe, da dies zumindest bei den rein batterieelektrischen Bussen aufgrund der derzeit verfügbaren Batteriekapazitäten nicht immer möglich ist, vor allem dann, wenn die Fahrgastraumheizung ebenfalls rein elektrisch erfolgen soll. Hier kann umlaufspezifisch über die Nachladung entlang der Strecke nachgedacht werden. Gegebenenfalls bietet sich auch eine Nachladung der Busse im Depot an, was jedoch dazu führen kann, dass sie durch ein weiteres Fahrzeug auf der Strecke ersetzt werden müssen. In diesen Fällen ist die vorhandene Standzeit im Depot bzw. an der Strecke ausschlaggebend für die notwendige Ladeleistung. Wasserstofffahrzeuge haben in aller Regel mit langen Umläufen weniger Probleme, bieten somit betriebliche Vorteile.

Weiterhin ist die Frage der gewünschten Versorgungssicherheit wichtig für die daraus abgeleiteten Anforderungen an die Redundanz der Infrastruktur. Dazu gehören neben der Netzversorgung (z. B. über Notstromaggregate) auch die H₂-Infrastruktur (z. B. mittels n+1-Redundanz der Hauptkomponenten wie Verdichter, Zapfsäule etc.) sowie der Wasserstoffversorgung (z. B. mittels Bevorratung von 1-2 Tagesbedarfen an Wasserstoff im Betriebshof²¹).

Die Analyse dieser Aspekte liefert üblicherweise verschiedene Optionen, wie das bisherige Diesel-fahrzeug durch ein emissionsfreies Fahrzeug ersetzt

5-13 | Einflussfaktoren und Randbedingungen für eine Erstauslegung der Infrastruktur und für die anschließende Entscheidung für eine Technologie (Sphera)



21 Im Rahmen des Projekts „New Bus Fuel“ wurden auf mehrere Fallstudien zum Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur analysiert. Dort hat sich eine Bevorratung von 1-2 Tagesbedarfen als wirtschaftlich sinnvollste Option dargestellt (Reuter, Faltenbacher, & Schuller, 2017).

werden kann und wie die entsprechende Infrastruktur in groben Zügen zu dimensionieren ist.

Neben der technischen Randbedingungen fließen in die schlussendliche Technologieentscheidung (Fahrzeug + Infrastruktur) u. a. bisherige Erfahrungen, Anforderungen an den Klimaschutz, Besonderheiten des Betriebshofes zur Fahrzeugversorgung (z. B. Flächenverfügbarkeit, Lage), Netzanschlussreserven, gewünschte Versorgungssicherheit sowie betriebliche und ökonomische Aspekte mit ein. Zu den betrieblichen Aspekten gehören beispielsweise Anforderungen an die Fahrzeugversorgung sowie die Notwendigkeit eines Betriebshofmanagementsystems (BMS), das für batterieelektrische Busse benötigt wird und u. a. das Lademanagement und die Einsatzplanung der Fahrzeuge abbildet (siehe hierzu auch Kapitel 6.1).

In den folgenden Kapiteln wird eine Erstausslegung der notwendigen Infrastruktur für die in Kapitel 4

dargestellten Fahrzeuge durchgeführt. Aufgrund der unterschiedlichen Eignung der Fahrzeugtypen für bestimmte Anwendungen beziehungsweise Umläufe, ist davon auszugehen, dass es in Zukunft häufig einen Mischbetrieb der verschiedenen Konzepte geben wird (z. B. Diesel und/oder BEV und oder H₂). Solch ein Mischbetrieb wird es zumindest in der mehrjährigen Einführungsphase mit einem schrittweisen Aufbau des Anteils an emissionsfreien Bussen geben bzw. als permanentes Betriebskonzept im Falle, dass keine vollständige Umstellung auf emissionsfreie Busse vorgesehen ist.

Bei den nachfolgenden Ausführungen zur Auslegung wird Einfachheit halber jedoch von einem sortenreinen Betrieb ausgegangen. Hierbei wird auf die notwendige Anschlussleistung und den damit verbundenen Anschluss ans öffentliche Stromnetz sowie den Flächenbedarf der einzelnen Fahrzeug- und dazugehörigen Energieversorgungskonzepte eingegangen.

5.4.1 Batterieelektrische Busse mit Depotladung

Bei BEV-Fahrzeugen, die im Depot geladen werden, muss entsprechend ausreichend Ladeleistung vorgehalten werden, um das Fahrzeug während der planmäßig verfügbaren Standzeit wieder vollständig aufladen zu können. Grundsätzlich sollte für jedes Fahrzeug ein Ladepunkt installiert werden. Zur überschlägigen Ermittlung der notwendigen Anschlussleistung je Ladepunkt kann folgende Formel herangezogen werden:

$$P_{L_{\text{Depot}}} [\text{kW}] = \frac{E_B [\text{kWh}] + E_{VK} [\text{kWh}]}{\text{Standzeit} [\text{h}]}$$

Die Ladeleistung ergibt sich damit aus dem Quotienten aus der Summe der nutzbaren Batteriekapazität (E_B) und der notwendigen Energie zur Vorkonditionierung (E_{VK}) (z. B. für die Vorwärmung bzw. Vorkühlung des Fahrgastraumes und das Batteriebalancing²²), geteilt durch die zur Verfügung stehende Standzeit. Bei sechs Stunden Standzeit und einem Energiebedarf von beispielhaft insgesamt ca. 305 kWh (280 kWh nutzbare Batteriekapazität + 20-30 kWh Energiebedarf zur Vorkonditionierung (siehe Textbox) und zum Balancing der Batterie ergibt sich somit eine rechnerische Ladeleistung von mindestens 50 kW pro Fahrzeug. Für eine Flotte von 50 Fahrzeugen ergibt sich dadurch eine Anschlussleistung von etwa 2,5 MW, was voraussichtlich einen zusätzlichen Mittelspannungsanschluss beziehungsweise die Erweiterung eines bereits bestehenden

Vorkonditionierung von BEV:

Bei BEV-Fahrzeugen entsteht im Gegensatz zu Dieselfahrzeugen keine Motorwärme, die zur Heizung des Fahrzeugs verwendet werden kann. Aus diesem Grund muss die dafür notwendige Energie in Form von Strom zur Verfügung gestellt werden. Um nicht unnötig Energie aus der Batterie zu verwenden, ist es von Vorteil die Vorkonditionierung des Fahrzeugs (Temperierung vor Fahrtbeginn) bereits im Depot am Ladepunkt durchzuführen. Die dafür notwendige Energie ist abhängig von der Fahrzeuggröße und der Außentemperatur und liegt bei -5°C für ein 12-m-Solofahrzeug in einer Größenordnung von ca. 15-20 kWh.

Mittelspannungsanschlusses auf die benötigte Anschlussleistung auf dem Betriebshof bedeutet. Möchte sich der Verkehrsbetrieb die Möglichkeit zur Zwischenladung der Fahrzeuge im Betrieb offenhalten, empfiehlt es sich, leistungstärkere Ladepunkte²³ zu installieren. Entsprechend der vorgesehenen Anschlussleistung erhöht sich der Gesamtbedarf für den Betriebshof. Hier ist es unerlässlich, frühzeitig den lokalen Netzbetreiber mit einzubinden, um eventuelle Schwächen im Netz und damit entstehende Einschränkungen bzw. erforderliche Netzertüchtigungsmaßnahmen für den Ausbau des Betriebshofs zu ermitteln.

Sofern genügend Netzreserve vorhanden ist, kann der Anschluss des Betriebshofs inklusive des Aufbaus der Ladeinfrastruktur erfolgen. Hierbei ist insbesondere die Leitungslegung zu beachten. Ein

22 Unter Batteriebalancing versteht man den Ladungsaustausch zwischen einzelnen Batteriezellen bzw. Zellreihen (innerhalb eines Fahrzeugs zur Sicherstellung einer gleichmäßigen Ladung der gesamten Batterie).

23 Das CCS-Protokoll ist beispielsweise bis 170 kW zugelassen (vgl. Abschnitt 5.2) wofür noch keine gekühlten Kabel verwendet werden müssen.

Aufbau des Transformators in der Nähe der Versorgungsleitung reduziert zwar die Anschlusskosten, kann aber für entsprechenden Mehraufwand bei der Anbindung der einzelnen Ladepunkte auf dem Betriebshof an die Trafostation sorgen. Dies ist immer im Einzelfall zu prüfen.

Zwischen Netzanschluss und dem eigentlichen Ladepunkt wird eine Leistungselektronik verbaut. Sie übernimmt die Steuerung des Ladepunkts, die Kommunikation zwischen den Ladepunkten und stellt damit die Intelligenz des Systems dar (siehe Kasten zum Lastmanagement).

Flächenbedarf für die Ladeinfrastruktur:

Bei klassischen Ladesäulen, die beispielsweise im öffentlichen Raum stehen, ist die Leistungselektronik in die Ladesäule integriert. Der Aufbau von Ladesäulen auf dem Betriebshof ist jedoch aus Platzgründen meist unvorteilhaft. Sie benötigen zwar rechnerisch nur etwa einen Quadratmeter Platz, blockieren jedoch bei einer Blockabstellung die Zwischenräume der Fahrzeuge und haben damit auch Einfluss z. B. auf mögliche Fluchtwege. Aus diesem Grund bietet es sich an, Leistungselektronik und Ladepunkt örtlich zu entkoppeln. Eine zentrale Leistungselektronik, die die dezentralen Ladepunkte ansteuert, ist daher aus Platzgründen vorteilhaft. Sie spart Platz in der Abstellung und ermöglicht eine relativ einfache Ausgestaltung der eigentlichen Ladeschnittstelle. Beispielsweise kann eine kabellose Ladelösung von oben durch Pantografen ohne wesentliche Platzeinschränkungen umgesetzt werden (siehe Abbildung 5-7 rechts). Sofern Kabel verwendet werden, kann eine Lösung „von oben“ erfolgen, um Platz zu sparen, z. B. über Kabelrollen oder ähnliche Systeme die sowohl den Fahrweg als auch im Idealfall den Fluchtweg frei von Ladekabeln halten (siehe auch VDV-Schrift 825).

Hierbei sind die Einbaumöglichkeiten hinsichtlich Platzbedarf (Stichwort max. Durchfahrtshöhe) und bei Befestigung am Dach bezüglich Dachlasten zu berücksichtigen. Hierzu gibt es verschiedene bauliche Lösungen. So wurde beispielsweise in Reutlingen ein „Ladegerüst“ in die Abstellhalle integriert (siehe Abb. 5.14)

Lastmanagement und Smart Charging:

Unabhängig von der installierten Anschlussleistung für die Gesamtflotte, empfiehlt sich die Vernetzung und zentrale Steuerung und Regelung der Ladepunkte, um Kosten zu sparen. Für den Netzanschluss sind üblicherweise einmalige Anschlusskosten beim Netzbetreiber zu bezahlen. Die laufenden Kosten der Energieversorgung ergeben sich aus Arbeits- [ct/kWh] und Leistungspreis [€/kW]. Die verbrauchte Strommenge kann dabei etwas vereinfacht als in etwa gleich angenommen werden, d. h. weitestgehend unabhängig davon, mit welcher Leistung geladen wird. Der Leistungspreis ist jedoch umso höher, je höher die gleichzeitig genutzte Leistung ist. Eine Optimierung hin auf niedrige Gesamtleistung, d. h. eine Verteilung der Ladezeiträume bzw. der Ladeleistung je Bus, mithilfe eines intelligenten Lastmanagements ist daher für Flotten zu empfehlen bzw. notwendig. Beispiele einzelner Verkehrsbetriebe zeigen, dass die maximal benötigte Ladeleistung bei Einsatz eines Lademanagements je nach Anwendungsfall um bis zu 50 Prozent (oder noch mehr) reduziert werden kann. (ViriCiti und Trapeze, 2019)

Eine andere Möglichkeit ist der Aufbau von Ladepollern, die einzig der Fixierung des Ladekabels dienen und nur wenig Platz (ca. 30 x 30 cm) in Anspruch nehmen. Unabhängig davon, ob die Kabelführung von oben oder horizontal (Poller) geschieht, sind bei diesen Konzepten immer entsprechende Vorschriften zu Fluchtwegen einzuhalten. Konkrete Zahlen zum Platzbedarf für die Ladeinfrastruktur sind aufgrund der unterschiedlichen Konzepte nur schwierig zu nennen.

5-14 | Abbildungen zum beispielhaften Flächenbedarf (links: Reutlinger Stadtverkehrsgesellschaft, Ladegerüst) (rechts: Kölner Verkehrsbetriebe, Ladesäule KVB)



5.4.2 Batterieelektrische Busse mit Gelegenheitsladung an der Strecke

BEV mit Gelegenheitsladung entlang der Strecke werden in aller Regel ebenfalls über Nacht im Depot wieder vollständig aufgeladen. Hier gelten somit die gleichen Grundsätze wie für Fahrzeuge mit Depotladung (Abschnitt 5.4.1). Aufgrund der üblicherweise geringeren Batteriekapazität kann bei gleicher Standzeit im Depot eine geringere Ladeleistung angesetzt werden. Somit ist auch die Anschlussleistung für den gesamten Betriebshof geringer.

Für die Ladung entlang der Strecke wird eine adaptierte Formel zur Bestimmung der Ladeleistung verwendet.

$$P_{L_{Strecke}} [kW] = \frac{E_B [kWh]}{\text{Standzeit [h]}}$$

Die notwendige Ladeleistung an der Strecke ($P_{L_{Strecke}}$) ist definiert als die notwendige Strommenge (E_B), geteilt durch die Standzeit. Als Beispiel wird eine Linie mit 30 Kilometer Länge angenommen. Bei einem Verbrauch von 2,8 kWh/km im Worst Case würde das Fahrzeug etwa 84 kWh Energie²⁴ benötigen. Bei einer Standzeit von 20 Minuten (beispielsweise an der Endhaltestelle der Linie) wäre somit eine rechnerische Ladeleistung von ca. 250 kW nötig. Reduziert sich die Standzeit aufgrund von Stau oder Verspätungen auf die Hälfte, muss entsprechend die doppelte Ladeleistung vorgehalten werden. Der Aufbau von Gelegenheitsladern entlang der Strecke im öffentlichen Raum bedarf daher einer vorausschauenden Planung, bei der wesentliche Aspekte beachtet werden müssen:

- 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)



- Eine Verlegung der Haltestelle bzw. des Ladepunktes (z. B. bei Bauarbeiten) ist nicht ohne Weiteres möglich

Der Flächenbedarf für den Ladepunkt im öffentlichen Raum hängt davon ab, welches Konzept verfolgt wird. Pantografen benötigen in der Regel wenig Platz, Gleiches gilt jedoch auch für eine Schnellladesäule. Gegebenenfalls ist der Bau einer neuen Trafostation mit entsprechendem Platzbedarf (siehe Abb. 5-15) nötig. Fahrzeuge mit Pantografen benötigen zudem eine klar definierte Halteposition, um eine Kopplung mit der Ladestation gewährleisten zu können. Auch ist auf eine einfache Anfahrbarkeit der Ladeposition zu achten. Dies kann über eine entsprechende Ausgestaltung der Haltestelle (z. B. über Haltepunktmarkierungen am Bordstein) meist sichergestellt werden. Ladeposition in Kurven führen aufgrund der Achsgeometrie der Fahrzeuge zu Winkelabweichungen am Pantografen und sind daher zu vermeiden. Tipps zur Umsetzung finden sich in Kapitel 5.3 der VDV-Schrift 260.

24 Bei einer Batteriekapazität von 150 kWh würde dies etwa 50 Prozent der nutzbaren Energie darstellen.

5.4.3 Oberleitungsbusse

Für emissionsfreie Fahrzeuge, die über eine Oberleitung gespeist werden, muss eine entsprechende Infrastruktur vorgesehen werden. Dies umfasst neben den (partiell) aufzubauenden Oberleitungen auch entsprechende Unterwerke, um die Fahrzeuge mit Strom versorgen zu können.

Oberleitungsbusse werden mithilfe von Stromabnehmern über die Oberleitungen mit 600-750 Volt Gleichspannung versorgt. Dies entspricht dem gleichen Spannungsniveau, mit dem auch Straßenbahnen betrieben werden. Analog zu Straßenbahnen wird der aufgenommene Strom direkt zum Antrieb der Fahrzeuge verwendet, es erfolgt somit eine kontinuierliche Leistungsaufnahme. Die Beschaffenheit des lokalen Stromnetzes und die vorhandene Reserve sind dabei ausschlaggebend für eine mögliche Umsetzung. Der lokale Netzbetreiber muss daher von Anfang an in die Überlegungen mit einbezogen werden. Durch den möglichen Eingriff in das Stadtbild durch den Aufbau der Oberleitungen ist zudem auf tendenziell längere Planungs- und Genehmigungszeiträume zu achten.

In einem Expertenworkshops des BMVI (BMVI, 2015) wurde 2015 über die Rolle des Obuses bei der Elektrifizierung der Busflotten und über bestehende Hemmnisse diskutiert. Oberleitungsbusse haben weiterhin das Image einer veralteten Technologie, das hauptsächlich durch die hohen Infrastrukturaufwendungen und die zum Zeitpunkt

der Abschaffung in den 1980er-Jahren veraltete Technik zurückzuführen ist. Dies ist jedoch mit modernen Fahrzeugen nicht mehr der Fall. Mit Obussen mit zusätzlicher HV-Batterie bzw. Brennstoffzelle lassen sich zudem die Aufwendungen für zusätzliche Oberleitungen reduzieren. Städtebaulich sensible Bereiche können – je nach Routenverlauf – ausgelassen werden. Für weitere detaillierte Infos zu Obussen sei auf (DLR, 2015) und (Trolley Motion, 2019) verwiesen.

Die Stadtwerke Solingen geben beispielsweise an, dass die Reichweite der Obusse mit HV-Batterie abseits der Oberleitung bei etwa 20 Kilometer liegt (Stadtwerke Solingen GmbH, 2019). Hier ist auf den Streckenabschnitten mit Oberleitung der zusätzliche Energiebedarf für das Wiederaufladen der HV-Batterie mit zu berücksichtigen. Zudem wird beispielsweise im Nahverkehrsplan der Stadt Berlin der Oberleitungsbus explizit erwähnt. Durch die an Bord befindliche Hochvolt-Batterie können die Streckenanteile an städtebaulich sensiblen Orten ohne Oberleitung befahren werden, wodurch nur etwa 50 Prozent der Strecke mit einer Oberleitung ausgestattet werden müsste. Internationale Beispiele für Oberleitungsbusse finden sich zudem in Bern, Genf, Salzburg oder Bologna (Land Berlin, 2019).

Sind die Trolleybusse mit HV-Batterien oder Brennstoffzellen-Range-Extender ausgestattet, ist auf dem Betriebshof eine Lade- bzw. Wasserstoffinfrastruktur zu installieren.

5-16 | Links: Batteriepack im Heck, Rechts: Bus mit der Oberleitung verbunden (Stadtwerke Solingen GmbH, 2019)



5.4.4 Wasserstoffangetriebene Busse mit Brennstoffzelle oder H₂-Verbrennungsmotor

Fahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb verfügen üblicherweise über eine HV-Batterie, die nur über den in der Brennstoffzelle erzeugten Strom bzw. durch Rekuperation aufgeladen werden kann²⁵. Sie benötigen somit – analog zu Fahrzeugen mit H₂-Verbrennungsmotor – lediglich eine Wasserstofftankstelle. Batterieelektrische Busse mit BZ-Antrieb als Range Extender und die dafür benötigte Energieversorgungsinfrastruktur werden im nächsten Abschnitt 5.4.5 behandelt.

Aufbauend auf dem errechneten Wasserstoffbedarf der Einzelumläufe, ergibt sich ein täglicher Wasserstoffbedarf für die gesamte Flotte, der die Basis für die Dimensionierung der Infrastruktur darstellt. Eine Flotte von 50 Solofahrzeugen mit einer durchschnittlichen täglichen Laufleistung von 250 Kilometer benötigt bei einem Verbrauch von etwa 9,0 kg H₂/100 km 1,1 Tonnen Wasserstoff pro Tag. Diese Menge muss somit in der Tankstelle 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 herausgestellt, dass eine Zwei-Tages-Bevorratung einen guten Kompromiss zwischen Investitionskosten (speziell die Wasserstoffspeicher) und Versorgungssicherheit darstellt (Reuter, Faltenbacher, & Schuller, 2017). Für die Beispielflotte ergibt sich somit eine notwendige Wasserstoffspeicherung von circa 2,2 Tonnen.

Um die zuverlässige Betankung der Busse gewährleisten zu können, muss immer dann, wenn ein

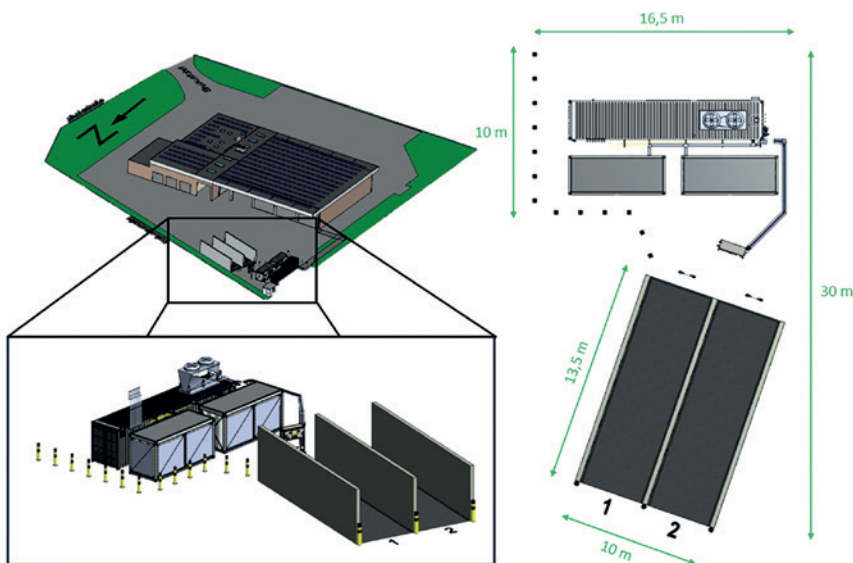
Fahrzeug zur Betankung ansteht, Wasserstoff auf ausreichend hohem Druck zur Verfügung stehen.

Diese Aufgabe übernehmen leistungsstarke Kompressoren, die in aller Regel redundant ausgeführt werden und je nach Kapazität der Tankstelle bis zu einige Hundert Kilowatt²⁶ Leistung benötigen. Damit muss auch hier die Leistungsreserve des vorhandenen Netzanschlusses geprüft und gegebenenfalls erweitert werden. Insgesamt zeigt sich jedoch, dass die Anschlussleistung der Wasserstoffinfrastruktur deutlich geringer ist als die der Ladeinfrastruktur.

Sofern Wasserstoff am Betriebshof über Elektrolyse vom Verkehrsbetrieb selbst oder von einem beauftragten Dritten hergestellt wird, muss bei einem 24/7-Betrieb²⁷ des Elektrolyseurs eine Anschlussleistung von etwa 2,6 kW pro erzeugtes Kilogramm Wasserstoff vorgehalten werden (Herstellerangaben). Bei einer Tageskapazität von 1,1 Tonnen ergibt sich damit ein zusätzlicher Leistungsbedarf von etwa 2,9 MW – was vergleichbar mit einer Ladeinfrastruktur für etwa 50 BEV-Fahrzeuge ist (siehe Abschnitt 5.4.1) ist. Folglich sind die Netzprüfung und die Einbindung des lokalen Netzbetreibers hier ebenfalls bereits zu einem frühen Projektzeitpunkt erforderlich.

Abbildung 5-17 zeigt die Wasserstofftankstelle des AREVA-Konsortiums für den Regionalverkehr Köln GmbH. Sie verfügt über eine Kapazität von bis zu 600 kg H₂/Tag und ist damit in etwa ausreichend für die tägliche Betankung von 25 Bussen. Die Anlieferung des Wasserstoffs erfolgt im gasförmigen Zustand an den beiden Trailer-Stellplätzen (1/2). Der Wasserstoff wird durch die Kompressoren (40-Fuß-Container)

5-17 | Darstellung der RVK-Wasserstofftankstelle auf dem Betriebshof Meckenheim (AREVA-Konsortium) (Kapazität von bis zu 600 Kilogramm Wasserstoff/Tag inklusive entsprechender Sicherheitsabstände und Schutzmaßnahmen)

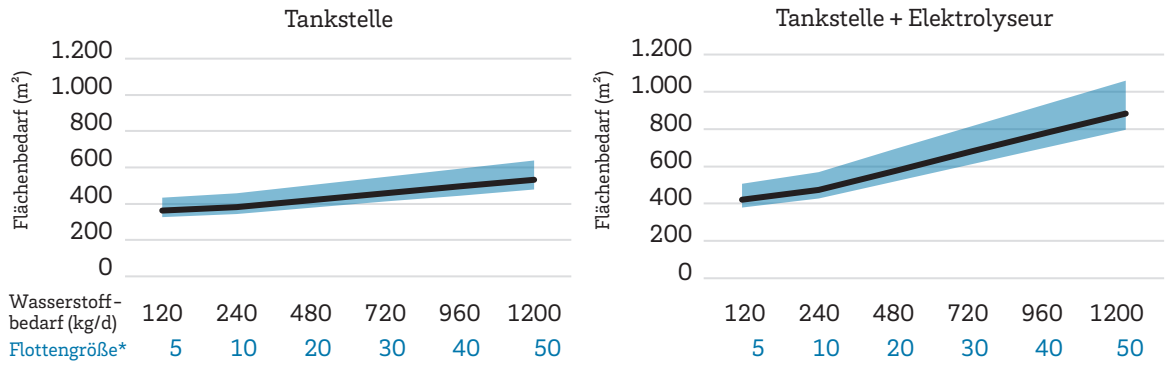


25 Der Wasserstoffbus Urbino Hydrogen von Solaris verfügt ebenfalls über eine Ladeschnittstelle, die auch für die Nachladung der Batterie auf dem Betriebshof genutzt werden kann.

26 ca. 200-300 kW für eine Flotte von 50 Bussen

27 Die Kopplung des Elektrolyseurs an eine erneuerbare Stromerzeugungsanlage (z. B. Windpark) ist aus ökologischen Gründen sinnvoll. Aufgrund der Volatilität der erneuerbaren Energien lässt sich jedoch meist kein 24/7-Betrieb darstellen. In diesem Fall muss für die gleiche Menge Wasserstoff ein leistungsstärkerer Elektrolyseur eingesetzt werden.

5-18 | Platzbedarf einer Wasserstoff-tankstelle (links) bzw. Tankstelle inklusive Wasserstoffherzeugung via Elektrolyse (rechts) (Sphera)



*Annahme ca. 26 kg Tagesbedarf für BZ

verdichtet und in den Hochdruckspeicherbänken (2x20-Fuß-Container) gespeichert. Insgesamt werden hierfür in etwa 500 m² Fläche – inklusive Sicherheitsabständen und Schutzmaßnahmen, jedoch ohne Tankspur für die Busse²⁸ – benötigt. Die Aufstellung der einzelnen Komponenten ist dabei flexibel umsetzbar. Abbildung 5-18 zeigt, welche Fläche in Abhängigkeit der Flottengröße bzw. des täglichen Wasserstoffbedarfs für die Wasserstofftankstelle vorzuhalten sind (links). Für eine Flotte von ca. 50 Fahrzeugen beläuft sich der Platzbedarf auf etwa 600 m². Wird zusätzlich ein Elektrolyseur aufgebaut, muss mit insgesamt circa 1000 m² gerechnet werden. Für nähere Informationen zu Wasserstofftankstellen sowie Möglichkeiten zur Flächenreduzierung wird an dieser Stelle auf (Kupferschmid & Faltenbacher, 2018) verwiesen.

Brennstoffzellenfahrzeuge für die energieintensiven, d. h. die längeren bzw. energetisch anspruchsvolleren Umläufe, als auch batterieelektrische Fahrzeuge mit Depotladung für die kürzeren Umläufe vor (Reinhold, Schreiber, & Wagner, 2019). Dies impliziert direkt den Aufbau sowohl einer Wasserstofftankstelle als auch entsprechender Infrastruktur, die auch von den BZ-REX-Fahrzeugen nutzbar wäre.

5.4.5 Batterieelektrische Busse mit Brennstoffzellen als Range Extender

Batterieelektrische Fahrzeuge mit einer Brennstoffzelle als Range Extender benötigen sowohl eine Ladeinfrastruktur als auch eine Wasserstoffinfrastruktur. Daher sind die bereits in den Abschnitten 5.4.1 und 5.4.4 erläuterten Aspekte gleichermaßen relevant. Da sich das BZ-REX-Fahrzeug aus zwei Energiequellen (Batterie und Wasserstoff) bedient, sind beide Speicher jeweils kleiner dimensioniert als bei Fahrzeugen, die nur Strom (BEV) oder nur Wasserstoff (BZ) nutzen. Die entsprechende Infrastruktur kann somit auch kleiner dimensioniert werden. Zudem ist beispielsweise der Aspekt der Vorkonditionierung im Winter (Vorheizen des Fahrgastraumes) aufgrund der Abwärme der Brennstoffzelle weniger kritisch als bei BEV.

Der Aufbau von sowohl Lade- als auch Wasserstoffinfrastruktur stellt aktuell jedoch noch ein Novum dar. Es zeichnet sich aber ab, dass dies für bestimmte Verkehrsbetriebe durchaus eine interessante Option ist. Die Stadt Frankfurt sieht in ihrem Konzept beispielsweise sowohl

28 Weitere Informationen zu Schutzmaßnahmen und Sicherheitsabstände finden sich in (Vd TÜV, 2009)

5.5. Ausbauplanung

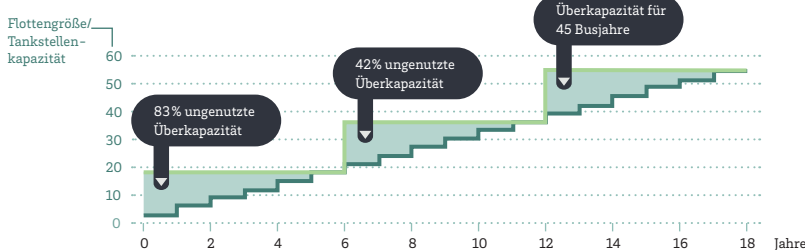
Im Anfangsstadium bei der Versorgung einiger weniger Fahrzeuge ist der Aufwand zur Bereitstellung der Infrastruktur vergleichsweise gering bzw. gibt es noch die Möglichkeit der Nutzung von temporären Übergangslösungen. Der Einsatz von einigen wenigen batterieelektrischen Fahrzeugen kann beispielsweise ohne zusätzlichen Netzanschluss mit dem Aufbau von klassischen Ladesäulen oder mobilen Ladegeräten abgedeckt werden. Gleiches gilt für kleine Flotten von Brennstoffzellenfahrzeugen. Im Projekt „H2Bus Rhein-Main“ werden die Fahrzeuge beispielsweise an der öffentlichen H₂-Tankstelle in Höchst betankt. Damit werden im Pilotstadium zusätzliche, unproduktive Leerkilometer in Kauf genommen. Für den täglichen Betrieb mit einigen Dutzend bis zu Hunderten von Fahrzeugen ist dies jedoch betrieblich nicht mehr umsetzbar. Schlussendlich wird dafür eine dezidierte Versorgungsinfrastruktur (Lade- bzw. H₂-Infrastruktur) auf dem Betriebshof benötigt.

Hierbei gilt grundsätzlich, dass die Infrastruktur möglichst bedarfsgerecht mit dem Aufbau der Flotte bereitgestellt werden sollte. Dadurch können entsprechende Überkapazitäten und damit verbundene zusätzliche Kosten vermieden werden. Hierbei gibt es jedoch einige Punkte zu beachten: Netzanschluss für batterieelektrische Fahrzeuge: Hier gilt es, frühzeitig den lokalen Netzbetreiber in die Planungen mit einzubinden, um sicherzustellen, dass der Standort auch für den geplanten Ausbau der Busflotte genügend Netzreserve vorweist. Trafostationen für die Anbindung der Ladeflächen an das Stromnetz sind zudem meist in verschiedenen Abstufungen vorhanden. Sind die Pläne für den Ausbau bekannt, kann der Netzanschluss bereits auf diese Planung hin ausgelegt werden. Hierbei sind auch entsprechende Planungszeiträume und Genehmigungsfristen vorzusehen. So ist beispielsweise für einen bei größeren

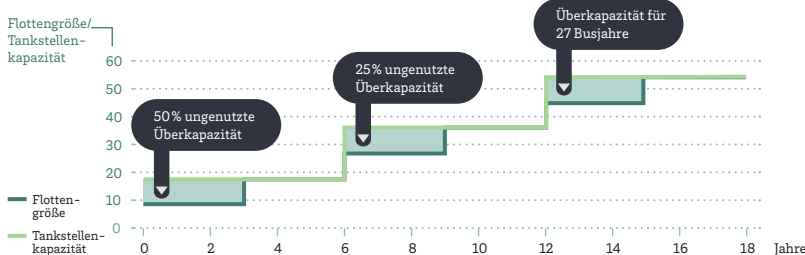
Flotten gegebenenfalls erforderlichen Anschluss an das Hochspannungsnetz mit drei bis vier Jahren von Planungsbeginn bis zur Umsetzung gerechnet werden. Die entsprechende Leistungselektronik und Ladepunkte sind meist modular ergänzbar und können mit der Fahrzeugbeschaffung mitgezogen werden. Allerdings ist es bei der Auslegung der Steuerung, d. h. der Intelligenz des Lademanagements darauf zu achten, dass diese auch entsprechend mit der „mitwachsen“ kann bzw. ob es erforderlich ist, dass die angestrebte Anzahl der zu versorgenden Fahrzeuge im Endausbauzustand bereits zu Beginn der Planungsaktivitäten, zumindest ungefähr, bekannt sein sollte. Tankstellenkapazität:

Jede Erweiterung der Tankstelle bedingt zusätzlichen Aufwand wie beispielsweise das Einholen von zusätzlichen Bau- und Betriebsgenehmigungen sowie die Durchführung baulicher Maßnahmen auf dem Betriebshof. Aus diesem Grund ist es wenig praktikabel, die Tankstelle parallel zur Flottenumstellung zu erweitern, da sich dadurch Überkapazitäten ergeben, die sich speziell im Anfangsstadium – bei noch kleinen BZ-Flotten – überproportional auf die Kosten auswirken. Dementsprechend bietet es sich an, die Fahrzeugbeschaffung auf den Ausbau der Tankstelle anzupassen. Dies kann beispielsweise eine gebündelte Fahrzeugbeschaffung und die längere Nutzung von Dieselfahrzeugen bedeuten. Abbildung 5-18 zeigt beispielhaft den Unterschied zwischen einer jährlichen Fahrzeugbeschaffung (oben, übliches Vorgehen) und einer gebündelten Fahrzeugbeschaffung (unten, hier alle drei Jahre). Auf jeden Fall ist es bei der Erstauslegung der H₂-Tankstelle sinnvoll, die angestrebte Kapazität im Endausbau zu ermitteln, um die entsprechenden Erweiterungsstufen sinnvoll definieren zu können und entsprechende Vorbereitungen mit einzuplanen, z. B. Genehmigung der Tankstelle entsprechend voraussichtlicher H₂-Lagermengen, Platzbedarf, Verrohrung mit entsprechenden Anschlussmöglichkeiten für weitere Speichermodule, Zapfpunkte etc.

Klassische Busbeschaffung und modulare Tankstellenerweiterung



Gebündelte Busbeschaffung und modulare Tankstellenerweiterung



Unabhängig davon, ob BEV oder BZ-Fahrzeuge eine Lösung für den Verkehrsbetrieb sind, lassen sich Überkapazitäten im Anfangsstadium auch dadurch vermeiden, dass die Versorgungssicherheit und Redundanz zunächst über die bestehende Dieselflotte gewährleistet werden. D. h., es bietet sich an, zumindest zu Beginn der Einführung emissionsfreier Busse eine erhöhte Fahrzeugreserve mit Dieselflotten vorzuhalten.

5-19 | Ausbau-
planung der
Tankstelle
(Kupferschmid &
Faltenbacher)

Die Einführung emissionsfreier Fahrzeuge wirkt sich auf alle Facetten des Busbetriebs aus. Neben dem Aufbau einer dezidierten Infrastruktur sind weitere Aspekte im betrieblichen Ablauf zu berücksichtigen. Diese werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

Weiterführenden Informationen sind u. a. in der VDV-Schrift 825 zu finden.

6.1 Energieversorgung, Einsatzplanung

Wie bereits in Kapitel 5.1 eingehend erläutert, unterscheiden sich die Energieversorgungskonzepte (siehe Kapitel 5.1) emissionsfreier Fahrzeuge wesentlich von dem Versorgungskonzept klassischer Dieselfahrzeuge. Dadurch muss auch der betriebliche Ablauf an das jeweilige Fahrzeug- und Energieversorgungskonzept angepasst werden.

Für batterieelektrische Fahrzeuge mit Übernachtladung bedeutet dies, dass die Fahrzeuge nach dem Einrücken ins Depot an die Ladeinfrastruktur angeschlossen werden müssen. Etwaige Rangierfahrten, die bisher zur Betankung der Fahrzeuge notwendig waren, können damit entfallen. Gleichzeitig kann ein früheres, ungeplantes Ausrücken der Fahrzeuge geringere Ladezeiten und damit eine reduzierte Reichweite mit sich bringen. Ein Betriebshofmanagement (siehe Textbox Seite 47) und die Kopplung der Einsatzplanung mit dem Energiemanagement der Fahrzeuge bzw. der Flotte werden daher bei batterieelektrischen Fahrzeugen unerlässlich. Ist beispielsweise die Ausrückzeit eines Fahrzeugs bekannt, kann über eine intelligente Steuerung der Ladeschnittstelle der Leistungsbedarf minimiert, die Batterie möglichst schonend geladen und das Fahrzeug punktgenau vorkonditioniert werden (siehe auch Boxen in Kapitel 5.4.1). Hierzu empfiehlt es sich, je nach Größe des Betriebshofs auf entsprechende einschlägige Softwarelösungen zurückzugreifen.

Gleiches gilt im Prinzip auch für batterieelektrische Fahrzeuge, die neben der Ladung über Nacht auch entlang der Strecke geladen werden. Der Fahrplan muss hier an den dezidierten Haltestellen entlang der Linie ausreichend Standzeit vorsehen, um die notwendige Energie beispielsweise

auch im Verspätungsfall zur Verfügung stellen zu können. Entsprechend sind auch die Leitstelle und der Fahrer kontinuierlich über die Restreichweite der Fahrzeuge zu informieren, um gegebenenfalls drohende Fahrtabbrüche aufgrund von niedrigem Ladezustand zu vermeiden. Bei Fahrzeugen mit Gelegenheitsladung ist zudem zu beachten, dass eine Blockade der Ladestation entlang der Strecke (z. B. aufgrund von Bauarbeiten) dazu führen kann, dass auf dieser Strecke ein Ersatzverkehr eingerichtet werden muss. Wie in Abschnitt 5.4.2 erwähnt wurde, ist eine Verlegung der Ladestation üblicherweise nicht mit angemessenem Aufwand möglich.

Durch eine intelligente Dimensionierung der Wasserstofftankstelle können Tankzeiten kleiner zehn Minuten und die notwendige Back-to-back-Kapazität²⁹ sichergestellt werden. Damit unterscheidet sich der eigentliche Tankvorgang kaum von der Dieselbetankung

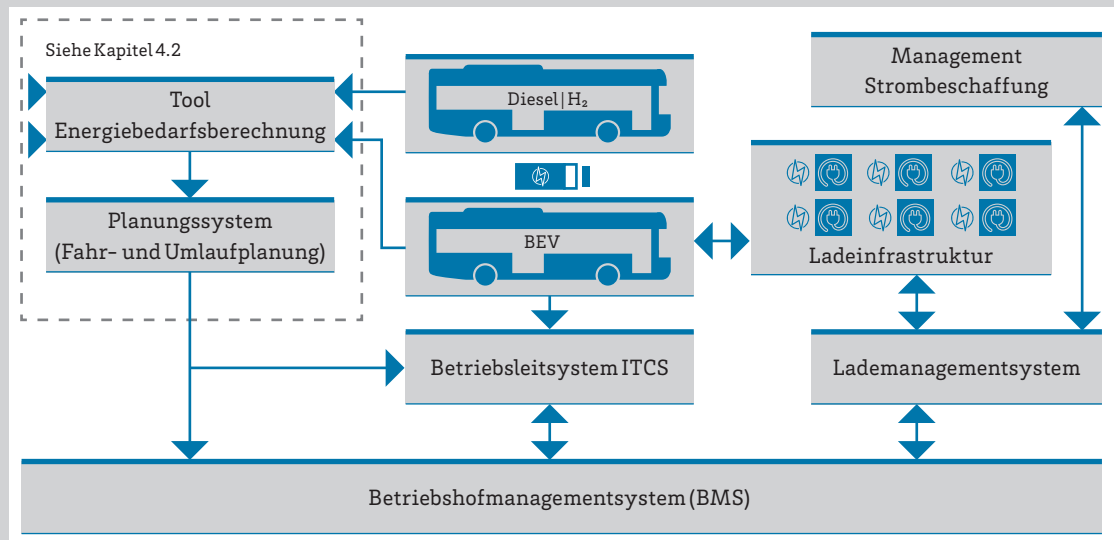
Grundsätzlich wird es – insbesondere in den Anfangsjahren – einen Mischbetrieb von konventionellen Fahrzeugen (und konventioneller Fahrzeugversorgung) und emissionsfreien Fahrzeugen geben. Dies muss in der Einsatzplanung und im Betriebsablauf mit berücksichtigt werden. Für weitere Informationen hinsichtlich der betrieblichen Einsatzplanung – speziell auch im Anfangsstadium sei auf die VDV-Mitteilung 2319 verwiesen.

6.2 Wartung

Der Antriebsstrang eines emissionsfreien Fahrzeuges ist meist weniger komplex als der Antriebsstrang eines Dieselfahrzeuges. Bewegte Teile wie Verbrennungsmotor oder Getriebe entfallen vollständig und werden durch eine HV-Batterie und einen üblicherweise wartungsarmen Antrieb mit E-Motor(en) ersetzt. Dadurch reduzieren sich die antriebsspezifischen Wartungsaufwände im Wesentlichen auf diese beiden Komponenten. Bei Wasserstofffahrzeugen wird dies durch die H₂-Komponenten Brennstoffzelle und Wasserstofftanks noch ergänzt. Hier sind zudem zusätzliche, H₂-spezifische Wartungsarbeiten wie beispielsweise die Kalibrierung der H₂-Sensoren und Filterwechsel in der Brennstoffzelle notwendig. Auf die für die Hochvolt- und

²⁹ Unter der Back-to-back-Kapazität versteht man die maximale Anzahl an Bussen, die nacheinander mit vergleichbarer Betankungsgeschwindigkeit versorgt werden können.

Das Betriebshofmanagementsystem (BMS) als Herzstück der betrieblichen Organisation einer batterieelektrischen Busflotte (VDV)



Aufgrund reduzierter Flexibilität im Betrieb und eingeschränkter Reichweite batterieelektrischer Busse im Vergleich zu Diesel- und Wasserstofffahrzeugen kommt der betrieblichen Organisation eine entscheidende Rolle zu. Die in Kapitel 4.2 dargestellte Energiebedarfsrechnung der einzelnen Umläufe kann teilweise dazu führen, dass die Fahr- bzw. Umlaufplanung angepasst werden muss. Aufgrund der geringeren Betriebskosten im Vergleich zu konventionellen batterieelektrischen Bussen sind die Verkehrsunternehmen gleichzeitig bestrebt, die Einsatzzeiten und Laufleistungen der batterieelektrischen Busse zu maximieren, um möglichst ökonomische Vorteile erzielen zu können.

Das Betriebshofmanagementsystem (BMS) stellt das Herzstück der batterieelektrischen Busflotte dar und hat die Aufgabe, unter Berücksichtigung der beschriebenen Randbedingungen eine robuste und ökonomische Betriebsplanung darzustellen. Das klassische BMS wird durch die Besonderheiten von batterieelektrischen Bussen um weitere Organisations- und Informationssysteme erweitert (siehe Abbildung). Das Betriebsleitsystem ITCS/RBL überwacht die Energieverbräuche und Ladezustände der Fahrzeugbatterien. Dadurch haben sowohl der Fahrer als auch die Leitstelle kontinuierlichen Überblick über die Energieversorgung und damit die Restreichweite der Fahrzeuge. Die Verknüpfung dieser Daten mit dem BMS ermöglicht ein effizientes Lademanagement. Es sorgt zum einen dafür, dass die einzelnen Fahrzeuge genau die Energie bekommen, die benötigt wird, um die Batterie wieder vollständig aufzuladen. Zum anderen kann es durch Kenntnis der Ein- und Ausrückzeiten und anstehenden Umläufe ein optimales Lastmanagement garantieren. Dadurch kann ein möglichst batteriechonender Ladevorgang bei gleichzeitiger Reduktion der Spitzenleistung (siehe auch Kapitel 5.4.1) erfolgen. Zur Optimierung der Strombezugskosten kann zudem ein Managementsystem zur Strombeschaffung sinnvoll sein, das den aktuellen Bedarf möglichst dann bedient, wenn der Strompreis gering ist.

Wasserstoff-Arbeiten notwendigen Schulungsinhalte und Qualifikationsprofile wird in Kapitel 6.4 eingegangen. Je nach Verkehrsunternehmen und spezifischen Randbedingungen wie Werkstattkapazität, Eignung der Werkstatt für emissionsfreie Fahrzeuge (vgl. Kapitel 6.3), zukünftiger Flottengröße und weiteren Aspekten kann es sich lohnen, Instandhaltungsarbeiten extern durchführen zu lassen. Genauere Informationen können in der VDV-Schrift 825 gefunden werden.

Ein Großteil der Wartungsaufgaben der Energieversorgungsinfrastruktur kann meist über eine Fernüberwachung abgebildet werden. Für die Ladeinfrastruktur sind kleinere Wartungsarbeiten wie beispielsweise die turnusmäßige Sichtprüfung bzw. der Wechsel der Luftfilter der Leistungselektronik vorzusehen. Diese können meist vom eigenen Personal durchgeführt werden. Zudem gibt es die Möglichkeit, eine modular aufgebaute Leistungselektronik einzusetzen, die bei

einem Defekt im Idealfall mittels „Hot-Swapping“-Funktionalität im Betrieb in kurzer Zeit getauscht werden kann.

Die Wartung der Wasserstoffinfrastruktur konzentriert sich im Wesentlichen auf die kritischen Komponenten wie Verdichter und Speicherbänke und kann über entsprechende Wartungsverträge mit dem Hersteller abgedeckt werden. Die Speicherbänke müssen in regelmäßigen Abständen (etwa alle fünf bzw. zehn Jahre) einer Ultraschallprüfung unterzogen werden, um entsprechende Rissansätze entdecken zu können. Alle zehn Jahre erfolgt die Festigkeitsprüfung der Druckspeicher. Hierzu wird ein Speichertankzylinder einer Berstdruckprüfung unterzogen und durch einen neuen Tank ersetzt. Über die Fernüberwachung der Tankstelle kann zudem der Füllstand der Tanks überprüft werden und können, sofern nötig, neue Wasserstofflieferungen angestoßen werden (Kupferschmid & Faltenbacher, 2018).



6.3 Werkstattanpassung

Die Einführung emissionsfreier Busse und der damit verbundene technologische Wandel wirken sich auch auf den Betrieb und die Ausrüstung der Werkstatt aus. Durch die notwendigen Tätigkeiten an den Hochvolt-Kraftfahrzeugen ist für den Werkstattbetrieb zusätzlich zu den bisherigen Anforderungen die DIN VDE 100 ff. gültig.

Da wesentlich Komponenten emissionsfreier Fahrzeuge auf dem Dach angebracht sind, müssen die Werkstätten mit Dacharbeitsständen versehen werden, um die Zugänglichkeit während der Wartungsarbeiten gewährleisten zu können. Weiterhin muss aufgrund der Hochvoltkomponenten die Möglichkeit bestehen, die Fahrzeuge spannungsfrei zu schalten. Sofern bereits Diesel-Hybrid-Busse eingesetzt werden, ist dies in der Regel bereits möglich. In Abhängigkeit der Instandhaltungstiefe sind ggf. darüber hinaus Prüf- und Diagnosegeräte erforderlich. Eine Übersicht hierzu ist in der VDV-Schrift 825 zu finden.

Sofern Fahrzeuge mit Wasserstoffantrieb eingesetzt werden, muss die Werkstatt zusätzlich über H₂-Sensoren sowie geeignete Lüftungseinrichtungen verfügen, sofern eine Wasserstoffansammlung im Gebäude möglich ist (siehe auch Abschnitt 5.3). Hier kann eine gutachterliche Begehung Klarheit – auch hinsichtlich notwendiger Explosionsschutzeinrichtungen – liefern (siehe auch (BGBahnen, 2009) und (Kupferschmid & Faltenbacher, 2018)).

6.4 Mitarbeiter/innen Qualifikation

Verschiedenste Projekte haben gezeigt, dass die Art und Weise, wie Mitarbeiter an die neue Technologie herangeführt werden, mitentscheidend für die Akzeptanz und den Erfolg der Einführung emissionsfreier Fahrzeuge ist (Warth, Faltenbacher, & Rock, 2013). Über entsprechende Schulungen können die Mitarbeiter/innen mit der Technik vertraut gemacht und auf den Wandel vorbereitet werden. Dazu gehören neben den Fahrern auch das Versorgungs- und Werkstattpersonal sowie die restlichen Mitarbeiter des Depots.

Grundsätzlich bietet es sich an, die betroffenen Personen in die Hochvolt-Technik und, sofern Wasserstofffahrzeuge eingesetzt werden, zusätzlich in die Wasserstofftechnik einzuführen. Fahrer und Fahrerinnen können über entsprechendes Fahrtraining auf die Eigenheiten des elektrischen Antriebs vorbereitet werden, um im späteren Betrieb eine möglichst energiesparende Fahrweise gewährleisten zu können.

Im Leitfaden „Elektromobilität – Arbeiten an Omnibussen mit Hochvolt-Systemen“ der Reihe VBG-Fachwissen wird auf die verschiedenen Qualifikationsprofile in Abhängigkeit von der jeweiligen Tätigkeit (siehe Abbildung 6-2) eingegangen. Die Werkstattmitarbeiter, die an den HV-Komponenten arbeiten, müssen spezifisch, je nach Tätigkeitsgebiet, ausgebildet werden. Für konkrete Qualifikationsinhalte für die entsprechenden Qualifikationsprofile sei auf (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), 2012) und (VBG- Ihre

gesetzliche Unfallversicherung, 2016) verwiesen. Anbieter einschlägiger Weiterbildungen sind u. a. der TÜV und die Handelskammern der Länder. Weiterhin bieten sich spezielle Ausbildungen zu den elektrischen Klimaanlageanlagen (z. B. Wärmepumpen) an, da sich diese von klassischen Klimaanlageanlagen in Dieselfahrzeugen unterscheiden. Im Rahmen der Arbeitsgruppe „Innovative Antriebe Bus“ wurden die Schulungsumfänge verschiedener Verkehrsbetriebe aufgenommen. Hierzu sei auf S. 132, Tabelle 12 in (Arbeitsgruppe Innovative Antriebe Bus, 2016) verwiesen.

Mitarbeiter mit Wartungsaufgaben an Wasserstofffahrzeugen sollten neben der allgemeinen Einführung zu Wasserstoff umfangreiche Schulungen zum Thema „Brennstoffzelle“ sowie die Gasanlagenprüfung (GAP) erhalten. Für weitere Informationen hinsichtlich Schulungsinhalten sei hier auf (Kupferschmid & Faltenbacher, 2018) bzw. auf die BGI5108 „Wasserstoffsicherheit in Werkstätten“ verwiesen.

6-2 | Qualifizierungsstufen für Tätigkeiten an HV-Fahrzeugen (DGUV-Information 200-005)

Stufe 3		zum Beispiel
Arbeiten unter Spannung am HV-System und Arbeiten in der Nähe berührbarer unter Spannung stehender Teile		<ul style="list-style-type: none"> - Fehlersuche, - Bauteile unter Spannung wechseln
Stufe 2		zum Beispiel
<ul style="list-style-type: none"> - Spannungsfreiheit herstellen - Elektrotechnische Arbeiten im spannungsfreien Zustand 	<ul style="list-style-type: none"> - Freischalten, - Gegen Wiedereinschalten sichern - Spannungsfreiheit feststellen - Tausch von HV-Komponenten - Stecker ziehen + Komponententausch (z. B. DC/DC-Wandler, elektrische Klimaanlage) 	
Stufe 1		zum Beispiel
Nichtelektronische Arbeiten	<ul style="list-style-type: none"> - Testfahrer, - Karosseriearbeiten - Öl, Radwechsel 	

Die Umstellung von konventionellen, (meist) dieselbetriebenen Fahrzeugflotten stellt die meisten Busbetriebe vor nicht unerhebliche ökonomische Herausforderungen. Aufgrund der Vielzahl an Möglichkeiten und sehr spezifischen Einflussfaktoren je Verkehrsunternehmen wie die Vorgaben der Clean Vehicles Directive eingehalten werden können, sind pauschalisierte Angaben zu Kosten nicht zielführend. Im Folgenden liegt daher der Fokus auf den Kostenarten und den jeweils wichtigsten Einflussfaktoren. Eine quantitative Ermittlung der Kosten ist im Rahmen zum Beispiel einer Machbarkeitsstudie oder Umsetzungsplanung individuell für jedes Verkehrsunternehmen durchzuführen. Generell geht bei neuen innovativen Antriebstechnologien darum, das zunächst höhere Risiko im Sinne einer Partnerschaft zwischen Betreiber und Hersteller möglichst gleichmäßig zu verteilen. Neben Fördermitteln von öffentlicher Seite können hier Leasingmodelle dazu dienen, Risiken zwischen Betreiber und Hersteller zu verteilen bzw. für den Betreiber die Hürde der hohen Erstanschaffungskosten zu reduzieren und damit den Einstieg in emissionsfreie Antriebstechnologien zu erleichtern. In diesem Kontext können auch „All inclusive“-Angebote interessant sein, d. h., der Betreiber zahlt einen vereinbarten Betrag je gefahrenen Linien-km, der sowohl die Fahrzeug- wie auch die Kraftstoff-/Energiekosten beinhaltet.

Fahrzeugkosten:

Die Anschaffungskosten für emissionsfreie Fahrzeuge liegen aktuell noch deutlich über den Anschaffungskosten von Dieselfahrzeugen. Ein batterieelektrisches Fahrzeug schlägt mit bis zu Faktor 2-2,5 im Vergleich zu Dieselbussen zu Buche, BZ-Fahrzeuge liegen etwa bei dem bis zu 2,5-Fachen der Anschaffungskosten (FCH JU, 2019). Aktuell sind die Preise hauptsächlich getrieben durch geringe Stückzahlen und hohe Komponentenkosten (Batterie, Brennstoffzelle, H₂-Tanks)³⁰. Werden Komponenten mit geringerer Leistung (und damit geringeren Komponentenkosten) verwendet, sind die Fahrzeuge typischerweise auch günstiger. Das momentan stark steigende Angebot emissionsfreier Fahrzeuge am Markt, die damit einhergehenden Produktionssteigerungen sowie die Ankündigungen verschiedener Hersteller (z. B. <https://www.h2bus.eu/>) lassen allgemein

sinkende Preise in der Zukunft erwarten. Aufgrund der geringeren Reichweite batterieelektrischer Fahrzeuge im Vergleich zu Dieselfahrzeugen kann zusätzlich zu den erwarteten Fahrzeugmehrkosten ein Mehrbedarf an Fahrzeugen entstehen, sofern die Dieselfahrzeuge 1:1 ersetzt werden sollen.

Wartungskosten:

Aufgrund der geringeren Komplexität des Antriebsstrangs emissionsfreier Fahrzeuge ist zu erwarten, dass sich günstigere Wartungskosten ergeben. Dies hängt auch wesentlich von den erzielbaren Betriebsstunden der Brennstoffzelle bzw. der Batterie ab, die gegebenenfalls einmal im Nutzungszeitraum getauscht werden muss. Hier kommt es darauf an, ob Full-Service-Verträge abgeschlossen werden oder ob die Wartung in der betriebshofeigenen Werkstatt durch geschultes Personal durchgeführt werden kann.

Energieinfrastruktur:

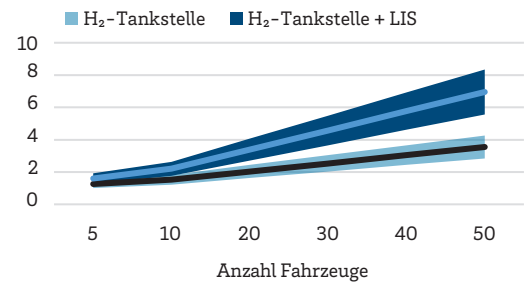
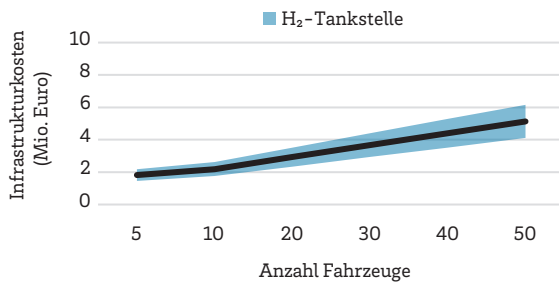
Die Anschaffungs- bzw. Installationskosten der Energieversorgungsinfrastruktur setzen sich aus mehreren Komponenten zusammen. Dazu gehören – sofern notwendig – beispielsweise die Kosten für den Netzanschluss, Kosten für den Transformator und entsprechende Tiefbauarbeiten. Wie hoch diese ausfallen, ist stark von der lokalen Situation abhängig³¹. Die Kosten für die Ladeinfrastruktur umfassen die Leistungselektronik und die Ladepunkte (Pantograf oder Ladekabel etc.) selbst. Bei der Anschaffung einer Wasserstoffinfrastruktur ist neben den Anlagenkomponenten (Kompressoren, Speicherbänken, Tanksäulen) gegebenenfalls auch die Anschaffung der H₂-Trailer in Erwägung zu ziehen. Alternativ kann dies auch an einen für die H₂-Versorgung zuständigen Dienstleister ausgelagert werden. Indikative Kostenabschätzung zu Wasserstofftankstellen für eine Flotte von bis zu 50 Bussen finden sich in Abbildung 7-1. Detailliertere Informationen finden sich in (Kupferschmid & Faltenbacher, 2018) beziehungsweise für größere Flotten in (Reuter, Faltenbacher, & Schuller, 2017).

Bei jeder Energieversorgungsinfrastruktur fallen zudem Wartungskosten an, die mitberücksichtigt werden müssen und sich je nach Technologie und Serviceumfang³² unterscheiden. Grundsätzlich

30 Üblicherweise werden die Batterien mit dem Fahrzeug verkauft und sind somit im Besitz des Verkehrsbetriebes. Eine weitere Möglichkeit ist auch das Leasing der Batterien. Dieses Modell wird beispielsweise von Volvo verfolgt. Dadurch lassen sich die Anschaffungskosten der Fahrzeuge reduzieren.

31 Indikative Kosten zum Aufbau einer Oberleitungsinfrastruktur beispielsweise in (DLR, 2015) zu finden.

32 Verfügbarkeitsgarantien haben beispielsweise einen großen Einfluss auf die zu veranschlagenden Wartungskosten.



7-1 | Indikative Kostenabschätzung für den Bau einer Wasserstofftankstelle für BZ-Fahrzeuge (links) sowie einer Wasserstofftankstelle und zusätzlicher Ladeinfrastruktur (LIS) für BZ-REX-Fahrzeuge (Kupferschmid & Faltenbacher, 2018)

gibt es sowohl bei der Lade- als auch der Wasserstoffinfrastruktur die Möglichkeit der Fernwartung.

Neben Wartungs- und Anschaffungskosten ist der Energiebedarf der Infrastruktur mit zu berücksichtigen. Hierzu zählt beispielsweise der Strombedarf für die Leistungselektronik der Ladeinfrastruktur oder der Energiebedarf der Tankstelle, der hauptsächlich durch die Kompressoren für die Verdichtung des H₂ bedingt ist.

Der Aufbau und Betrieb der Ladeinfrastruktur obliegen üblicherweise dem Busbetrieb. Je nach vorhandener Inhouse-Expertise kann sich der Verkehrsbetrieb Unterstützung bei der Planung und dem Aufbau der Ladeinfrastruktur beschaffen. Die lokalen Stadtwerke oder auch auf Ladeinfrastruktur spezialisierte Firmen können hier unterstützen. Teilweise bieten auch die Bushersteller Busse und Infrastruktur aus einer Hand an. Der lokale Netzbetreiber ist in allen Fällen ein wesentlicher Planungspartner bei der Umsetzung. Die Strombeschaffung erfolgt entsprechend über den lokalen Stromversorger. Für die Wasserstoffinfrastruktur ergeben sich verschiedene Betreibermodelle:

- 1. Investition und Betrieb durch Busbetrieb:**
Die Infrastruktur ist im Besitz des Busbetriebs. Er vergibt die Wasserstofflieferung oder betreibt die H₂-Erzeugungsanlage (z. B. Elektrolyseur) selbst.
- 2. Investition durch Busbetrieb und Betrieb durch Dritte** (z. B. einschlägiges Fachunternehmen):
Die Vergütung erfolgt dabei üblicherweise pauschal oder je Kilogramm Wasserstoff.
- 3. Investition und Betrieb durch Dritte** (z. B. einschlägiges Fachunternehmen):
Hierbei werden meist entsprechende Abnahmeverträge ausgehandelt, damit sich die Investition für den Hersteller amortisieren kann.

Werkstatt:

Die Ertüchtigung der Werkstatt mit den in Abschnitt 6.3 erwähnten Komponenten (z. B.

Sensoren, Lüftungseinrichtungen) muss ebenfalls mit berücksichtigt und entsprechende Kosten in der Planung veranschlagt werden. Je nach Zustand und Eignung der aktuellen Werkstatt ergeben sich die dafür notwendigen Investitionskosten.

Personal:

Wie bereits in Kapitel 6.4 erläutert wurde, sind die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für den Erfolg der Technologie von entscheidender Bedeutung. Die Kosten für Umschulungs- und Weiterbildungsmaßnahmen sind dementsprechend in die Planung mit aufzunehmen. Weiterhin können sich aufgrund der geringeren Reichweite der Fahrzeuge (Kapitel 4.2) ein Fahrzeugmehrbedarf sowie zusätzliche Leerkilometer für Zwischenladungen oder Fahrzeugtausch und damit zusätzlicher Personalbedarf ergeben.

Energie:

Einen wesentlichen Teil der Gesamtbetriebskosten eines Busses machen nach den Personalkosten die Kraftstoffkosten aus. Für die Energieträgerkosten emissionsfreier Fahrzeuge ist dabei von Relevanz, ob grüner oder konventioneller (grauer) Strom beziehungsweise Wasserstoff verwendet wird. Letzterer ist meist günstiger zu bekommen, bringt aber beispielsweise nur bedingt eine Entlastung in puncto Klimawirkung (siehe Kapitel 8).

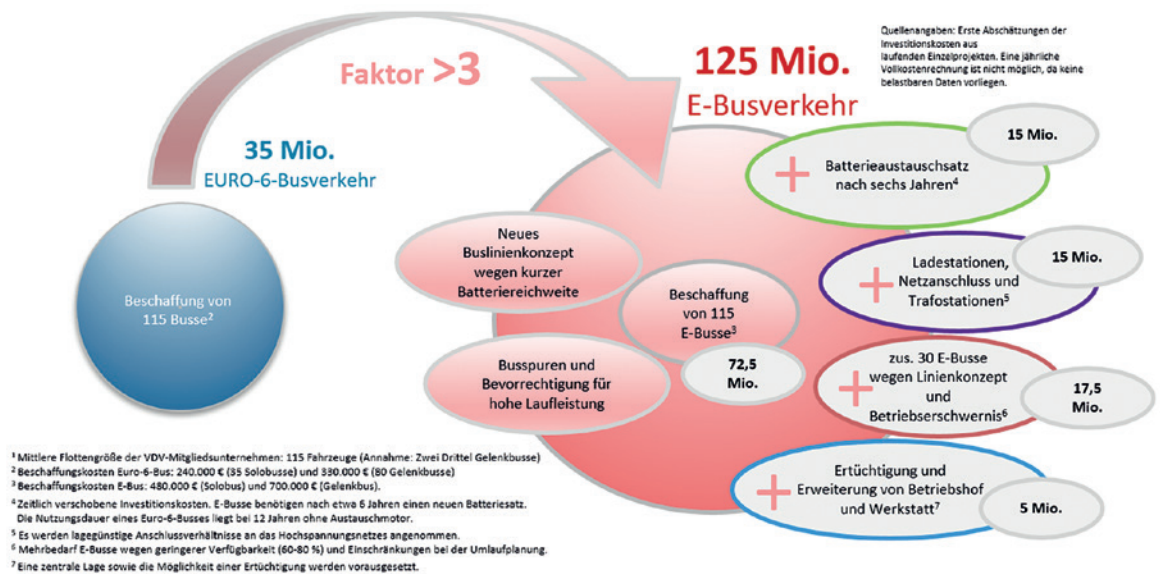
Für batterieelektrische Fahrzeuge wird der Strompreis im Wesentlichen durch die jährliche Stromabnahmemenge inklusive der geltenden Steuern und Abgaben bestimmt. Seit 2017 gilt für batterieelektrische Busse beispielsweise der gleiche Stromsteuersatz wie für Schienenbahnen bzw. Oberleitungsbusse. Weiterhin setzt sich der VDV für eine Angleichung der Abgabenbelastung (insbesondere die Reduktion der EEG-Umlage) an das Niveau von Schienenbahnen ein, da dies eine wesentliche Stellschraube für die Wirtschaftlichkeit von batterieelektrischen Bussen darstellt.

Für Brennstoffzellenfahrzeuge ist bei der H₂-Lieferung der Bezugspreis von Wasserstoff die entscheidende Größe, die maßgeblich von der lokalen Verfügbarkeit von Wasserstoff, der Transportentfernung und der Abnahmemenge bestimmt wird.

Wird Wasserstoff vor Ort über einen Elektrolyseur hergestellt, sind die Stromkosten entscheidend. Für weitere Informationen sei hier auf Kapitel 3.8 in (Kupferschmid & Faltenbacher, 2018) verwiesen. Die nachfolgende Grafik gibt einen beispielhaften

Überblick über die Investitionsmehrkosten, die sich überschlägig bei einer vollständigen Umstellung einer Busflotte mit 115 Bussen (mittlere Flottengröße im VDV) ergeben.

7-2 | Beispielhafter Investitionskostenvergleich konventioneller Dieselsebuse vs. batterieelektrische Busse für die VDV-Musterflotte (115 Busse) (VDV, 2018)



Die Motivation der Clean Vehicles Directive ist die Verbesserung der Luftqualität und Reduktion der Treibhausgase sowie die Schaffung eines Marktes für emissionsfreie Fahrzeuge. Luftschadstoffe wie Stickoxide und Staubemissionen sowie Lärmemissionen sind dort relevant, wo sie ausgestoßen werden, also während der Nutzungsphase, des Betriebs der Fahrzeuge. Da lokal emissionsfreie Fahrzeuge im Betrieb keine Schadstoffe emittieren und die daraus resultierenden Vorteile hinreichend bekannt sind, wird darauf nicht im Detail eingegangen. Für die Klimawirkung ist der Ort der Emission hingegen irrelevant. Eine Verlagerung der Emissionen hin zur Herstellung der Fahrzeuge bzw. hin zur Herstellung der Energieträger Strom und Wasserstoff kann somit unter Umständen den Vorteil des emissionsfreien Betriebs wieder aufzehren.

Aus regulatorischer Sicht (CVD, EU-Flottengrenzwerte für Pkw und Lkw) spielen diese Emissionen zwar (noch) keine Rolle, eine ganzheitliche Betrachtung von Wasserstoff und Strom als Energieträger ist jedoch nur unter Berücksichtigung dieser vorgelagerten Emissionen seriös möglich. Über eine Ökobilanzierung (Lebenszyklusanalyse) der Fahrzeuge wird neben der Nutzungsphase auch analysiert, wie das Fahrzeug hergestellt und die genutzten Rohstoffe und Energieträger gewonnen werden.

In den nachfolgenden Kapiteln werden zunächst die Emissionen der Bereitstellung von Strom und Wasserstoff aus verschiedenen Quellen dargestellt. Mittels einer Lebenszyklusbetrachtung, wie sie in Abbildung 8-1 am Beispiel eines Stadtbusses, dargestellt ist, wird darauf aufbauend eine ganzheitliche Abschätzung der Emissionen getätigt.

Recycling der kritischen Rohstoffe alternativer Antriebe:

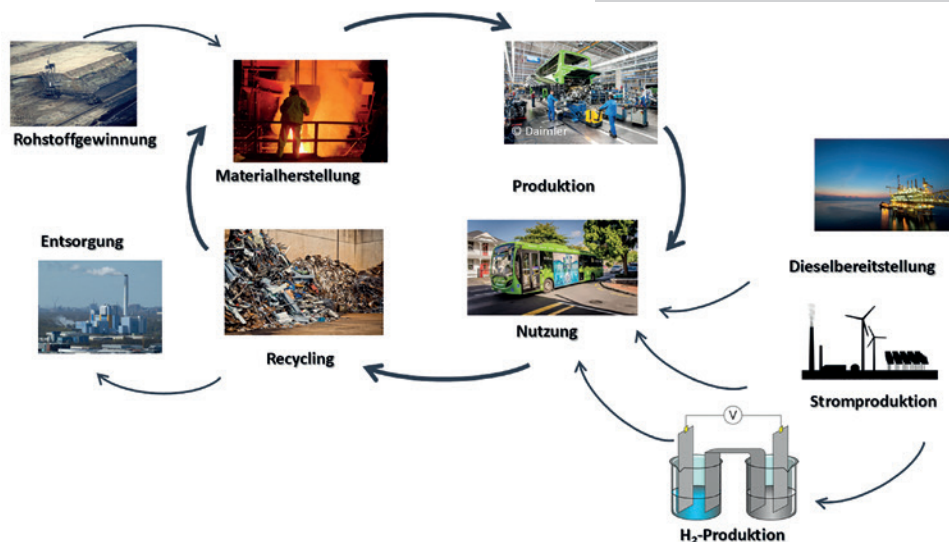
Mit dem Aufkommen alternativer Antriebe wird in der Öffentlichkeit auch vermehrt eine Diskussion über die dafür notwendigen Rohstoffe und deren Recyclingmöglichkeiten geführt.

Bereits heute existieren technische Ansätze für das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien. Diese fokussieren sich bisher häufig auf die Wiedergewinnung von Kobalt, Nickel und Kupfer sowie auf Massenmetalle und Elektronikbauteile. Zunehmend wird jedoch auch Lithium wiedergewonnen. Auch zur Rückgewinnung von Platin aus Brennstoffzellen existieren verschiedene Ansätze, sodass in Zukunft mit hohen Rückgewinnungsraten aus Brennstoffzellen gerechnet werden kann.

Ebenso existieren verschiedene Ansätze zum Recycling der Magnetrohstoffe der Elektromotoren. Diese reichen von der Wiederverwendung ganzer Permanentmagneten bis hin zur Rückgewinnung der einzelnen darin enthaltenen Rohstoffe. Diese werden jedoch aktuell noch nicht in großem Maße genutzt.

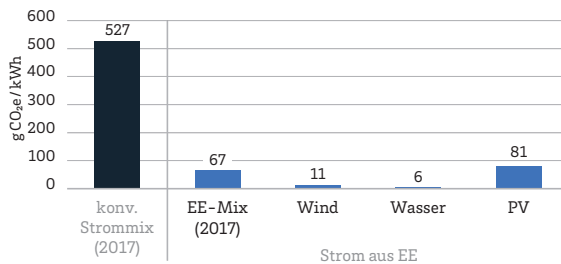
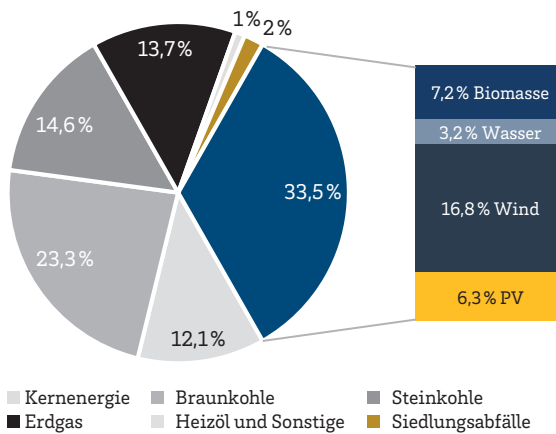
Kupfer stellt ein positives Beispiel mit einem bereits etabliertem Wiedergewinnungssystem dar, auch wenn hier die Erträge und Effizienzen noch gesteigert werden können, um die Materialverluste zu minimieren.

Große Unsicherheit geht generell von der Frage aus, wie viele der Fahrzeuge am Lebensende dem Recycling zur Verfügung stehen werden bzw. welcher Anteil sich diesem beispielweise durch Exporte entzieht. Die Etablierung wirtschaftlich tragfähiger Recyclingverfahren hängt dabei maßgeblich von der Verfügbarkeit ausreichend großer und auch möglichst stabiler Mengenflüsse an zu recycelnden Komponenten- bzw. Materialien ab (Reuter, Hendrich, Hengstler, Kupferschmid, & Schwenk, 2019).



8-1 | Lebenszyklus eines emissionsfreien Stadtbusses (Sphera)

8-2 | Strommix Deutschland und Treibhausgasemissionen der Strombereitstellung für 2017 (Sphera)



8.1 Emissionen der Energieträgerbereitstellung

8.1.1 Elektrizität

Abbildung 8-2 zeigt den Strommix im Jahr 2017 und die zugehörigen Treibhausgasemissionen (in CO₂-Equivalenten) je Energieträger. Bei konventioneller Erzeugung werden pro Kilowattstunde Strom 527 Gramm CO₂-Equivalenten ausgestoßen³³, was insbesondere an dem noch hohen Anteil der Stromerzeugung durch Kohle liegt. Berücksichtigt man nur den 33,5%igen Anteil erneuerbarer Energieträger, ergeben sich gemittelte Emissionen von 67 Gramm CO_{2e}/kWh Strom, was einer Reduktion von etwa 87 Prozent entspricht. Setzt man für die Jahresfahrleistung eines batterieelektrischen Busses 60 000 Kilometer und ein Stromverbrauch von 160 kWh/100 km an, so werden allein durch die Stromherstellung 51 Tonnen CO_{2e} pro Jahr (konventioneller Strommix, 6,4 Tonnen bei erneuerbarem Mix) emittiert. Zum Vergleich entstehen durch die Bereitstellung und Verbrennung von 36 Liter Dieselkraftstoff/100 km 65 Tonnen CO_{2e} pro Jahr³⁴. Dies gibt bereits eine erste Indikation, dass durch die Nutzung von konventionellem Strom in der Nutzungsphase der Fahrzeuge nur geringe Einsparungen im Vergleich zur Nutzung von Diesel möglich sind. Für die vollständige Bewertung wird auf die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse in Kapitel 8.2 verwiesen.

8.1.2 Wasserstoff

Da Wasserstoff in der Natur nicht in elementarer Form vorzufinden ist, muss er unter Zufuhr von Energie hergestellt werden. Dies ist beispielsweise über die Elektrolyse von Wasser möglich. Hierbei wird durch Elektrizität Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten. Die Treibhausgasemissionen dieses Herstellungspfades sind somit direkt an die Emissionen der jeweiligen Stromerzeugung gekoppelt. Unter Verwendung von Strom aus erneuerbaren Energien (aktueller EE-Mix gemäß Abbildung 8-2) werden über dieses Verfahren 3,8 Kilogramm CO_{2e}/kg H₂ emittiert. Das Verfahren gewinnt aufgrund der Möglichkeit der Nutzung erneuerbaren Stroms immer mehr an Bedeutung, spielt aktuell jedoch noch eine untergeordnete Rolle (EY, 2016).

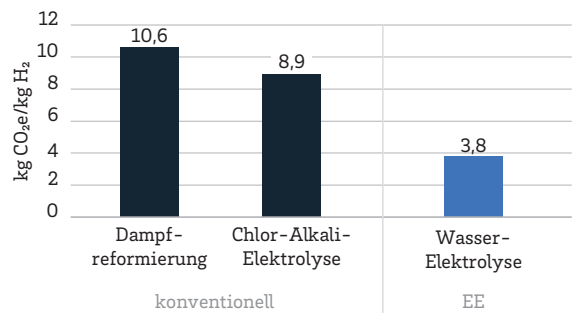
Der Großteil des aktuell gehandelten Wasserstoffs wird aktuell in der Industrie beispielsweise in Chemieanlagen und Raffinerien genutzt und auch dort hergestellt. Etwa 90 Prozent des in Deutschland produzierten Wasserstoffs werden aus Kohlenwasserstoffen (meist aus Erdgas) über die Dampfreformierung gewonnen (10,6 Kilogramm CO_{2e}/kg H₂). Zudem fällt Wasserstoff beispielsweise bei der Herstellung von Chlor als Nebenprodukt an (8,9 kg CO_{2e}/kg H₂ bei der Verwendung von konventionell erzeugtem Strom).

Wird Wasserstoff über die Dampfreformierung hergestellt, werden bei einem Verbrauch von

³³ Hier sind neben den direkten Emissionen bei der Stromerzeugung auch die Aufwände bei der Bereitstellung der Energieträger (z. B. Erdgas- und Kohleförderung) mit berücksichtigt.

³⁴ Die Berechnung basiert auf den Bereitstellungsemissionen von Dieselkraftstoff von 0,53 kg/l (thinkstep, 2019) und einem Emissionsfaktor für die Verbrennung von 2,48 kg CO_{2e}/l Diesel (gemäß DIN EN 16258).

9,0 Kilogramm H₂/100 km pro Jahr und BZ-Bus somit 57 Tonnen CO₂e emittiert. Bei der Elektrolyse mit erneuerbarem Strom reduziert sich dieser Wert auf 21 Tonnen CO₂e pro Fahrzeug und Jahr. Auch hier zeigt sich, dass die Nutzung von Wasserstoff aus der Dampfreformierung ähnlich hohe Emissionen aufweist wie die Bereitstellung und Verbrennung von Diesel (65 Tonnen CO₂e pro Jahr, siehe vorheriger Abschnitt).



8.2 Ganzheitliche Bewertung, Lebenszyklusanalyse

Im vorherigen Kapitel wurde diskutiert, dass durch die Nutzung von konventionell erzeugtem Strom bzw. konventionell erzeugtem Wasserstoff in Bussen keine bzw. nur eine geringe Reduktion der Treibhausgasemissionen in der Nutzungsphase erzielbar ist.

Abbildung 8-4 zeigt die Emissionen entlang des gesamten Lebenszyklus der Fahrzeuge. Es zeigt sich, dass die erhöhten Emissionen bei der Herstellung von Wasserstoff- bzw. batterieelektrischen Fahrzeugen bei der Nutzung von erneuerbarem Strom bzw. Wasserstoff in der Nutzungsphase wieder ausgeglichen werden. Mit etwa 90 Tonnen CO₂e werden beispielsweise bei batterieelektrischen Fahrzeugen aufgrund der energieintensiven Batterieproduktion etwa doppelt so viele Emissionen ausgestoßen als bei Dieselfahrzeugen. Brennstoffzellenfahrzeuge liegen mit etwa 70 Tonnen zwischen konventionellen und batterieelektrischen Fahrzeugen³⁶. Je weniger Energie zum Antrieb benötigt wird und je geringer die individuellen CO₂e-Emissionen der Energieträger (Herstellung und gegebenenfalls Verbrennung) sind, desto flacher steigen die Emissionen über die Fahrkilometer an. Tabelle 8-1 zeigt die angenommenen Verbrauchswerte.

Hier zeigt sich der energetische Vorteil der batterieelektrischen Fahrzeuge in der Nutzungsphase.

Durch die direkte Nutzung des Stroms wird der THG-Vorteil gegenüber den Wasserstofffahrzeugen bei hoher Fahrleistung deutlich. Dort wird durch die zusätzlichen Umwandlungsschritte (Strom → H₂ → Strom) mehr Energie benötigt. Der Break-even-Point, der Punkt, an dem eine emissionsfreie Fahrzeug aus Lebenszyklussicht weniger Treibhausgasemissionen ausstößt als ein Dieselfahrzeug, ist bei Brennstoffzellenfahrzeugen bei etwa 30 000 km, bei batterieelektrischen Fahrzeugen bei etwa 45 000 Kilometer erreicht³⁷.

Insgesamt ist für batterieelektrische Fahrzeuge eine CO₂e-Reduktion über den Lebenszyklus von 75 Prozent (55 Prozent bei BZ-Fahrzeugen) gegenüber Dieselfahrzeugen möglich, sofern die gleiche Fahrleistung vorausgesetzt wird. Aufgrund der geringeren Reichweite ist dies aktuell jedoch nicht in gleichem Maße gegeben. Daher gilt es, durch intelligentes Energiemanagement und eine abgestimmte Einsatzplanung (Kapitel 6.1) die Auslastung und Fahrleistung der BEV-Fahrzeuge zu optimieren, um die Vorteile voll auszuschöpfen.

Wird konventionell erzeugter Strom verwendet, ergibt sich für batterieelektrische Fahrzeuge bei gleicher Fahrleistung aktuell keine rechnerische Einsparung. Für wasserstoffbetriebene Fahrzeuge lässt sich bei der Nutzung von Wasserstoff aus der Dampfreformierung unter den angenommenen Verbräuchen ebenfalls keine Einsparung erzielen. Durch die zunehmende Dekarbonisierung des Stromsektors bzw. durch die Nutzung erneuerbarer Energieträger bei der konventionellen

Tabelle 8-1: Angenommene Verbrauchsdaten für die Berechnung der Lebenszyklusemissionen (je 100 Kilometer) (Sphera)

	Diesel	BEV	BZ	BZ-REX
Diesel (Liter)	36 l			
Strom (Kilowattstunde)		160 kWh		45 kWh
Wasserstoff (Kilogramm)			9,0 kg	5,5 kg

³⁵ Die THG-Emissionen der konventionellen Erzeugung von Wasserstoff aus der Chlor-Alkali-Elektrolyse wurde entsprechend CertifHy über einen Energieverbrauch von 80,75 kWh/kg H₂ (Castro et al. (CertifHy), 2015) mit einem Allokationsschlüssel von 21 Prozent (Barth, F. (CertifHy), 2019) und den Emissionen der konventionellen Stromerzeugung (siehe Abbildung 8-2) berechnet.

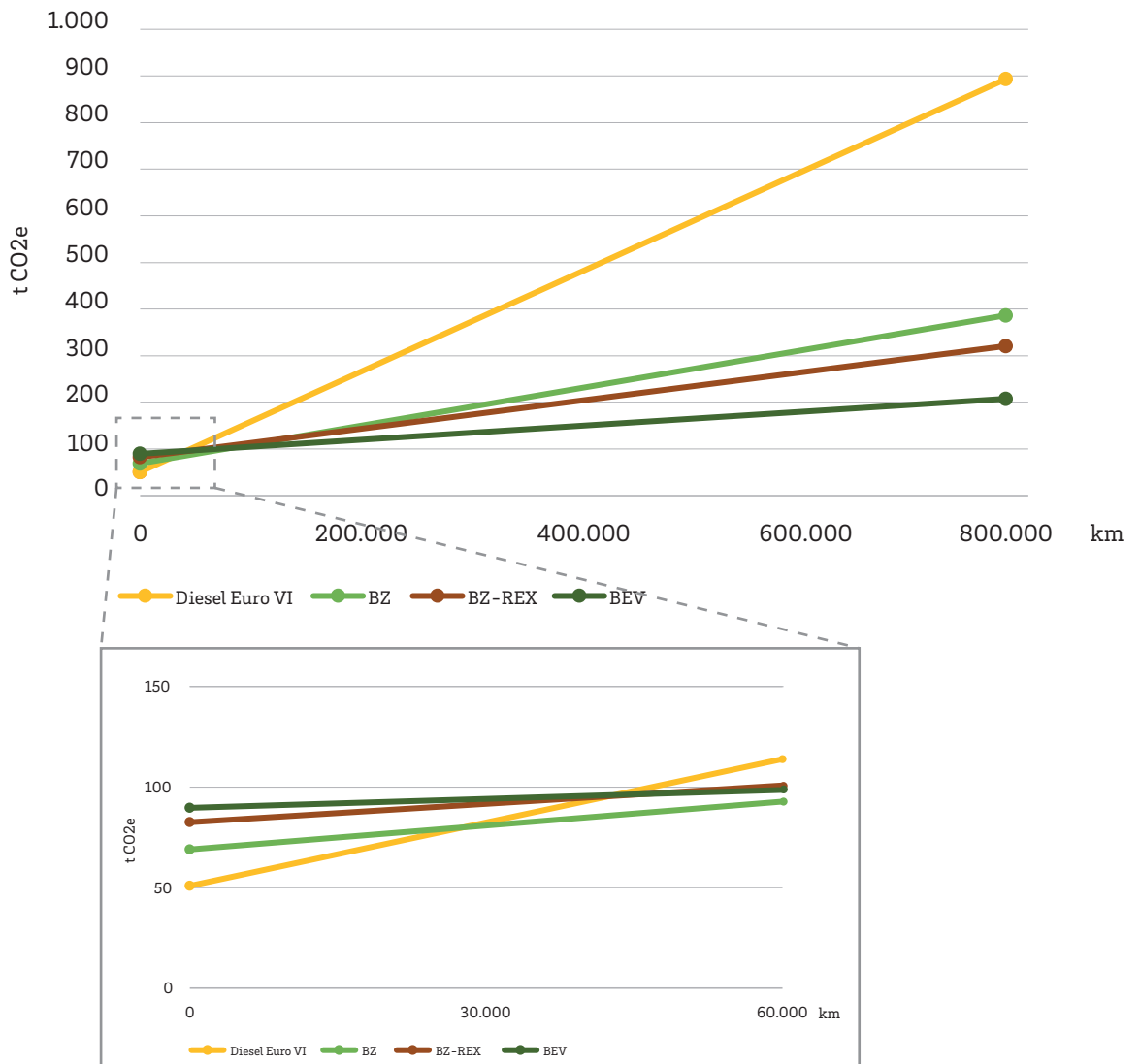
³⁶ Die Produktion der Komponenten Batterie, Brennstoffzelle, H₂-Tanks etc. hat einen wesentlichen Einfluss auf die Emissionen der Fahrzeugherstellung. Fahrzeuge mit kleineren Komponenten (z. B. BEV als Gelegenheitslader) weisen hier einen Vorteil auf.

³⁷ Bei Nutzung von erneuerbarem Strom bzw. erneuerbarem Wasserstoff.

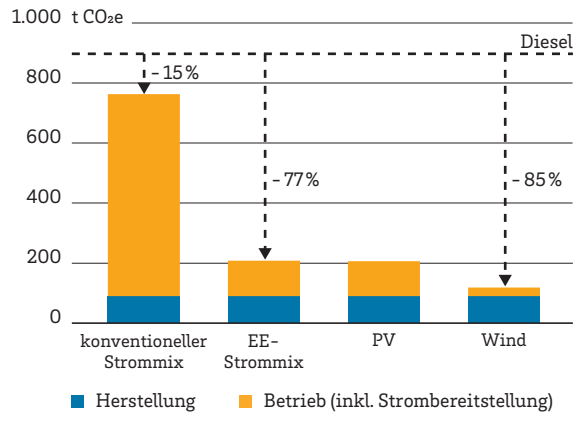
Wasserstoffherstellung werden alle emissionsfreien Fahrzeuge zukünftig jedoch einen THG-Vorteil gegenüber Dieselfahrzeugen vorweisen können. Um die THG-Potenziale, die sich durch die Nutzung emissionsfreier Fahrzeuge ergeben, voll ausschöpfen zu können, ist es damit zwingend erforderlich, dass die erneuerbaren Energien weiter gestärkt werden und das Energiesystem zügig auf rein erneuerbare Stromerzeugung umgestellt wird.

Abbildung 8-5 zeigt anhand eines batterieelektrischen Busses den Einfluss der Stromquelle auf die THG-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus. Die Emissionen der Herstellung sind unabhängig von der Stromquelle im Betrieb in allen Fällen zu berücksichtigen. Während unter Einsatz von konventionellem Strom im Betrieb nur geringfügige Einsparungen erzielt werden können, ergeben sich je nach Stromquelle Reduktionen von bis zu 85 Prozent (Windstrom) im Vergleich zum Dieselfahrzeug.

8-4 | THG-Emissionen über den Buslebenszyklus unter Verwendung von Strom aus erneuerbaren Energien bzw. Wasserstoff aus der Elektrolyse mit EE-Strom (Sphera)



8-5 | THG-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus für batterieelektrische Fahrzeuge unter Verwendung verschiedener Strommixe im Betrieb (Sphera)



9.1 Arbeitsgruppe „Innovative Antriebe Bus“ der Bundesministerien BMU und BMVI

Um Betreiber bei der Umstellung auf emissionsfreie Busse zu unterstützen, stellt die Bundesregierung, genauso wie die meisten Bundesländer und die Europäische Union, Fördermittel für die Beschaffung von elektrisch angetriebenen Bussen und der dazugehörigen Lade- bzw. Wasserstoff(H₂)-Tankinfrastruktur bereit. Weiterhin schafft die Bundesregierung mit der gemeinsam vom Bundesverkehrsministerium (BMVI) und Bundesumweltministerium (BMU) initiierten Arbeitsgruppe „Innovative Antriebe Bus“ (kurz AG Bus) eine Plattform für den Informations- und Erfahrungsaustausch zwischen Verkehrsunternehmen, Herstellern, Forschungsinstitutionen und den beteiligten Bundesministerien.

Die Koordination auf programmatischer Ebene für das BMVI wird von der NOW GmbH³⁸ wahrgenommen, Ansprechpartner für das BMU ist der Projektträger VDIVDE-IT GmbH³⁹.

9.2 Planung

Nachdem bereits in Kapitel 5 auf die einzelnen Schritte bei der Auslegung der Infrastruktur eingegangen wurde, sind im Folgenden die grundsätzlichen Planungsschritte für die Einführung von emissionsfreien Fahrzeugen und der damit verbundenen Infrastruktur in Kürze dargestellt und in (Kupferschmid & Faltenbacher, 2018) zusammengefasst (siehe auch Abbildung 9-1).

1. Vorbereitende Aufgaben (z. B. Machbarkeitsstudien, Analyse der Umläufe auf Eignung etc.): Machbarkeitsstudien eignen sich besonders für Verkehrsunternehmen, die sich mit der Einführung emissionsfreier Fahrzeuge bis dato noch nicht im Detail auseinandergesetzt haben. Sie liefern über eine umlaufspezifische Energiebedarfsbestimmung erste Erkenntnisse über die Eignung der verschiedenen Fahrzeugkonzepte für das eigene Unternehmen.

2. Definition der Hauptparameter der Infrastruktur:

Auf Basis des Energiebedarfs und des geplanten Flottenhochlaufs kann, wie in Kapitel 5 dargestellt, eine Erstausslegung der Infrastruktur erfolgen. Dabei sollten nun auch die jeweiligen Randbedingungen geklärt werden. Dies umfasst beispielsweise die Frage, inwiefern für batterieelektrische Busse aufgrund von Flächenverfügbarkeit, Netzkapazität etc. überhaupt Ladestationen auf bestimmten Linien beziehungsweise im Depot aufgestellt werden können oder welche Strecken (teilweise) mit Oberleitungen versehen werden können. Bei H₂-Bussen sind mögliche Einschränkungen bezüglich der Wasserstoffspeichermenge (siehe auch Kapitel 9.2) oder der Wasserstofflogistik (Anlieferung) frühzeitig aufzuzeigen.

3. Definition der Projekt-Rahmenbedingungen:

Auf Basis der definierten Betriebsparameter, Energiebedarfe und zukünftigen Erweiterungspläne des ÖPNV sind die weiteren Randbedingungen zu definieren. Dazu gehören beispielsweise Kostenaspekte oder die Frage, ob lokale Emissionsfreiheit ausreichend ist oder mit Blick auf den Klimaschutz grüner Strom beziehungsweise grüner Wasserstoff verwendet werden soll. Dieser Schritt hilft, aufkommende Zielkonflikte frühzeitig zu erkennen und geeignete Lösungsansätze zu entwickeln.

4. Lastenhefterstellung:

Als nächster Schritt ist das Lastenheft für die Infrastruktur zu erstellen. Wichtige Aspekte sind neben den technischen Randbedingungen die Versorgungssicherheit, Flächenverfügbarkeit sowie Verfügbarkeitsanforderungen an die Infrastruktur. Hier kann beispielsweise auch definiert werden, ob der Netzanschluss in Form eines Transformators Teil des Lieferumfangs sein soll oder ob hierfür ein separates Lastenheft erstellt wird. Auch kann an dieser Stelle bereits ein Verweis auf das gewünschte Betreibermodell (vgl. Kapitel 7) erfolgen.

5. Dialog mit möglichen Lieferanten:

Mit dem erstellten Lastenheft können erste Informationen und unverbindliche Kostenindikationen von potenziellen Lieferanten eingeholt werden. Dieser Dialog dient zur weiteren Optimierung des Lastenhefts, der Definition passender Geschäftsmodelle, Verantwortlichkeiten etc.

³⁸ Kontakt unter kontakt@starterset-elektromobilität.de

³⁹ Kontakt unter elmo@vdivde-it.de

6. Finale Lastenhefterstellung:

Auf Basis des finalen Lastenhefts inklusive aller technischen, organisatorischen und juristischen Aspekte kann die Infrastruktur ausgeschrieben werden.

Grundsätzlich handelt es sich hierbei um einen iterativen Prozess. Das Projekt entwickelt sich durch die Kommunikation und Interaktion mit den relevanten Stakeholdern kontinuierlich weiter.

Dazu gehören beispielsweise politische Entscheidungsträger, Netzbetreiber, Lieferanten und Mitarbeiter. Weitere Informationen finden sich in für Ladeinfrastruktur in der VDV-Schrift 260 und zur Wasserstoffinfrastruktur in (Reuter, Faltenbacher, & Schuller, 2017) und (Kupferschmid & Faltenbacher, 2018).

In Abbildung 9-1 ist dieser Prozess am Beispiel einer Wasserstoffinfrastruktur dargestellt.

9-1 | Ablauf eines Projekts zum Aufbau einer Energieinfrastruktur am Beispiel einer H₂-Tankstelle (Kupferschmid & Faltenbacher)



9.3 Genehmigung

9.3.1 Stromversorgungsinfrastruktur

Beim Aufbau der Stromversorgungsinfrastruktur bzw. dem Anschluss an das Stromnetz, sind die Technischen Anschlussbedingungen (TAB) der jeweiligen Spannungsebene (für Busbetriebe in den meisten Fällen Mittelspannung) des lokalen Netzbetreibers zu beachten

Die Errichtung einer Trafostation auf dem Betriebshofgelände bedarf der Zustimmung des Geländeeigentümers (ggf. Stadt). Für einen rechtssicheren Betrieb sind zudem entsprechende Gestattungs- sowie Netzanschluss- und Anschlussnutzungsverträge mit dem Netzbetreiber abzuschließen und entsprechende baurechtliche Anforderungen einzuhalten.

Speziell bei hoher Anschlussleistung (und begrenzter Netzkapazität) sind dezidierte Netzuntersuchungen erforderlich. Dadurch lassen sich vorab vorhandene Netzaufgaben einhalten sowie notwendige Netzschutzmaßnahmen ableiten. Dies ist im Detail mit dem lokalen Netzbetreiber bei Projektstart zu besprechen. Der Planungs- und Umsetzungszeitraum eines Anschlusses an das Mittelspannungsnetz kann etwa mit 5-7 Monaten veranschlagt werden, sofern keine Netzertüchtigungsmaßnahmen notwendig sind. Inklusive des Aufbaus der einzelnen Ladeinfrastrukturkomponenten vor Ort ergibt sich damit ein indikativer Planungs- und Umsetzungszeitraum für die Errichtung der Ladeinfrastruktur im Bereich von 8-11 Monaten. Beim Anschluss an das Hochspannungsnetz muss mit mindestens drei Jahren gerechnet werden. Weitere Informationen sind in der VDV-Schrift 260 zu finden.

9.3.2 Wasserstoffinfrastruktur

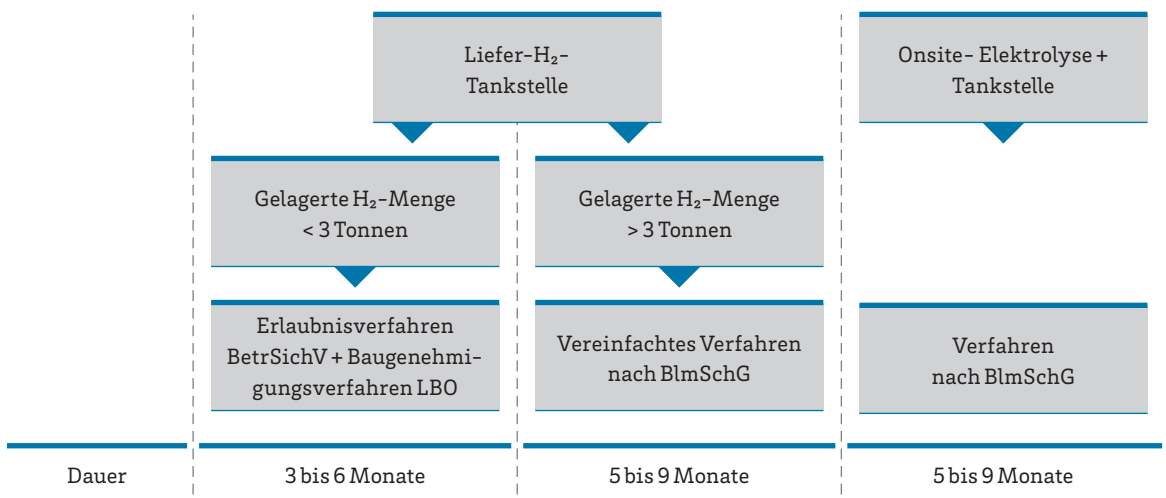
Das für die Wasserstoffinfrastruktur relevante Genehmigungsverfahren lässt sich im Wesentlichen durch die Beantwortung der beiden Fragen ableiten:

1. Wird Wasserstoff angeliefert oder vor Ort erzeugt?
2. Übersteigt die gelagerte Wasserstoffmenge drei Tonnen?

Übersteigt die gelagerte Menge drei Tonnen oder wird lokal Wasserstoff 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 (siehe Abbildung 9-2). Die indikativen Genehmigungszeiträume je Genehmigungsverfahren können ebenfalls Abbildung 9-2 entnommen werden.

In allen Fällen ist eine Gefährdungsbeurteilung gemäß Betriebssicherheitsverordnung durchzuführen, um die standortspezifischen Randbedingungen zu berücksichtigen (Kupferschmid & Faltenbacher, 2018). Weitere Informationen sind in (NOW, 2018), (EY, 2016) und (LBST, 2011) zu finden.

9-2 | Genehmigungsverfahren der Wasserstoffinfrastruktur (Kupferschmid & Faltenbacher)



9.4 Weiterführende Literatur

Allgemeines:

- VDV-Schrift 230/1 | Rahmenempfehlung für elektrisch betriebene Stadt- Niederflur-Linienbusse (E-Bus)
- VDV-Schrift 825 | Auswirkungen der Clean Vehicles Directive im Linienbus auf Betriebshöfe und Werkstätten
- Starterset Elektromobilität (NOW/BMVI): <https://www.starterset-elektromobilitaet.de/Bausteine/OEPNV/>
- Erneuerbar mobil (VDIVDE_IT/BMU): https://www.erneuerbar-mobil.de/projekte?projectsubjects=13&partner=All&project_status=All&combine=
- Statusbericht 2015/16 – Hybrid- und Elektrobusprojekte in Deutschland (AG Bus) Link
- DGUV-Information 200-005: Qualifizierung für Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvoltsystemen
- VBG-Fachwissen: Leitfaden Elektromobilität – Arbeiten an Omnibussen mit Hochvolt-Systemen, http://www.vbg.de/DE/3_Praevention_und_Arbeitshilfen/1_Branchen/09_OePNV_und_Bahnen/7_Omnibusbetriebe/Elektromobilitaet/1_Leitfaden/Leitfaden_node.html

Ladeinfrastruktur:

- VDV-Schrift 260 | E-Bus – Infrastruktur/ Ladestellen
- VDV-Schrift 261 | Empfehlung zur Anbindung eines dispositiven Backends an einen Elektrobus, ergänzend zur ISO-Norm 15118
- VDV-Mitteilung 2319 | Bewertung von E-Buskonzepten aus der Sicht von Planung und Betrieb

H₂-Infrastruktur:

- Thinkstep/NOW 2018: Einführung von Wasserstoffbussen im ÖPNV
<https://www.now-gmbh.de/content/service/3-publikationen/1-nip-wasserstoff-und-brennstoffzellentechnologie/einfuehrung-von-wasserstoffbussen-im-oepnv-leitfaden.zip>
- NewBusFuel-Dokumente (detaillierte Informationen und Best-practice-Ansätze zu Infrastrukturkomponenten, Platzbedarf, Umweltwirkungen, Kosten und Projektablauf von Wasserstoffinfrastruktur) – nur in englischer Sprache verfügbar: <http://newbusfuel.eu/publications/>
- Fuel Cell Bus Europe (Informationen zu Wasserstoffbusprojekten in Europa inklusive Erläuterungen zur Technologie, Fahrdaten, etc.): <https://www.fuelcellbuses.eu/>

- Arbeitsgruppe Innovative Antriebe Bus.** (2016). Statusbericht 2015/16 - Hybrid- und Elektrobusprojekte in Deutschland.
- Barth, F. (CertifHy).** (2019). Key lessons from the pilot, Session 3.3, CertifHy 2 Final Stakeholder Conference and Plenary.
- BGBahnen.** (2009). BGI 5108 - Wasserstoffsicherheit in Werkstätten.
- BGHM - Berufsgenossenschaft Holz und Metall.** (2012). DGUV Information 200-005: Qualifizierung von Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvolt-systemen.
- BMVI.** (2015). Fachworkshop: HO-Bus - Wirtschaftliche Möglichkeiten und ästhetische Herausforderungen für die Elektrifizierung des städtischen Busverkehrs.
- Castro et al. (CertifHy).** (2015). D2.4 Technical report on the definition of „CertifHy Green“ Hydrogen, Deliverable D2.4 report.
- Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV).** (2012). Qualifizierung für Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvoltssystemen - BGI/GUV-I 8686.
- DLR.** (2015). Potenziale des Hybrid-Oberleitungsbusses als effiziente Möglichkeit für die Nutzung erneuerbarer Energien im ÖPNV.
- electrive.** (2019). electrive.net. Retrieved Juni 27, 2019, from <https://www.electrive.net/2019/06/11/solaris-stellt-neuen-brennstoffzellen-bus-urbino-12-hydrogen-vor/>
- Element Energy Limited.** (2018). Update on European hydrogen bus activity.
- Europäische Union.** (2019). RICHTLINIE (EU) 2019/1161 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 20. Juni 2019.
- EY.** (2016). Wasserstoff-Infrastruktur für die Schiene.
- Faltenbacher, M. e.** (2016b). 8. Treffen der AG Innovative Antriebe im straßengebundenen ÖPNV, 19.04.2016 . Berlin. (Sphera ehemals thinkstep)
- FCH JU.** (2019). Fuel Cell Electric Bus. Retrieved Juni 06, 2019, from <https://www.fuelcellbuses.eu/projects/jive-2>
- Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI .** (2017). E-Bus-Standard: Ansätze zur Standardisierung und Zielkosten für Elektrobusse.
- Hydrogenics.** (2016). EU P2G platform: Electrolyzer technology of the BioCat project.
- Keyou.** (2019, Februar). Keine Kompromisse mehr bei Reichweite und Ökonomie. Omnibus Revue (02/2019). Retrieved Juni 27, 2019
- Kupferschmid, S., & Faltenbacher, M.** (2018). Einführung von Wasserstoffbussen im ÖPNV - Fahrzeuge, Infrastruktur und betriebliche Aspekte. NOW GmbH. Sphera (ehemals thinkstep) für NOW GmbH
- Land Berlin.** (2019). Nahverkehrsplan Berlin 2019-2023; Stand 25. Februar 2019. Berlin.
- LBST.** (2011). Sichere Wasserstoffinfrastruktur.
- NOW.** (2018). Genehmigungsleitfaden für Wasserstoff-Stationen. Retrieved from <https://www.h2-genehmigung.de/>
- Reinhold, T., Schreiber, T., & Wagner, C.** (2019, Mai 2.). Elektrifizierung des städtischen Busverkehrs - Das Frankfurter Konzept. Internationales Verkehrswesen - Ausgabe 2-2019.
- Reuter, B., Hendrich, A., Hengstler, J., Kupferschmid, S., & Schwenk, M.** (2019). Rohstoffe für innovative Fahrzeugtechnologien - Herausforderungen und Lösungsansätze. Sphera (ehemals thinkstep), e-mobil BW GmbH.
- Reuter, D. B., Faltenbacher, D., & Schuller, D.** (2017). New Bus Fuel ReFuelling for European Hydrogen Bus Depots - Guidance Document on Large Scale Hydrogen Bus Refuelling, Sphera (ehemals thinkstep)
- Stadtwerke Solingen GmbH.** (2019). BOB - BatterieOberleitungsBus. Retrieved Juni 07, 2019, from <https://www.bob-solingen.de/>
- thinkstep.** (jetzt Sphera) (2019). eigene Berechnungen.
- thinkstep.** (jetzt Sphera) (2019). GaBi LCI Datenbank.
- Trolley Motion.** (2019). Trolley Motion e.V. - Informationen zu Trolley Bussen. Retrieved August 19, 2019, from <https://www.trolleyemotion.eu/freier-wissensbereich/>
- VBG- Ihre gesetzliche Unfallversicherung.** (2016). VBG-Fachwissen: „Elektromobilität - Arbeiten an Omnibussen mit Hochvolt-Systemen“ .
- VdTÜV.** (2009). Druckgase 514 - Anforderungen an Wasserstofftankstellen.
- VDV.** (2014). VDV-Schrift 2319: Bewertung von E-Bus-Konzepten aus der Sicht von Planung und Betrieb.
- VDV.** (2016). VDV-Schrift 260: E-Bus - Infrastruktur/Ladestellen.
- VDV.** (2018). Entwicklung der Kosten durch Umstellung auf E-Busse. Köln.
- VDV.** (2019). VDV-Schrift 825 04/2019: Auswirkungen der Clean Vehicles Directive im Linienbus auf Betriebshöfe und Werkstätten.
- ViriCiti und Trapeze.** (2019). Datenintegration im Elektrobusbetrieb: Von Disposition bis zum Depot, Webinar. Retrieved August 24, 2019, from https://www.youtube.com/watch?v=wb_5DNk7a4g&feature=youtu.be
- Warth, H., Faltenbacher, M. & Rock, A.** (2013). CHIC D2.2 - Report on maintenance and training concepts implemented, EvoBus & Sphera (ehemals thinkstep)

Abbildungsverzeichnis

Titelseite:	HOCHBAHN	Seite 33	VDV
Seite 4	Richtlinie (EU) 2019/1161 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2019	Seite 34	Wolfgang Hubenthal, FFG Fahrzeugwerkstätten Falkenried GmbH
Seite 5	Sphera (ehemals thinkstep), 2019, Satz VDV	Seite 35	DGUV-Information 200-005, 2012 Satz VDV
Seite 6	SSB AG	Seite 37	Sphera (ehemals thinkstep), 2019
Seite 7	Sphera (ehemals thinkstep), 2019	Seite 38	VDV
Seite 9	Richtlinie (EU) 2019/1161 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2019	Seite 39	Sphera (ehemals thinkstep), 2019
Seite 12	Grafiken von oben nach unten: Vestische Straßenbahnen GmbH, Stadtwerke Solingen GmbH, HOCHBAHN, SSB, Keyou, Satz VDV	Seite 40	Sphera (ehemals thinkstep), 2019
Seite 15	Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI, 2017	Seite 41	Sphera (ehemals thinkstep), 2019
Seite 16	oben: Sphera (ehemals thinkstep) 2019, Satz VDV unten: Sphera (ehemals thinkstep), 2018	Seite 42	Sphera (ehemals thinkstep), 2019
Seite 17	TU Dresden 2020, Satz VDV	Seite 43	Sphera (ehemals thinkstep), 2019
Seite 18	Sphera (ehemals thinkstep), 2019	Seite 45	Kupferschmid & Faltenbacher, 2018
Seite 19	oben: WSW mobil GmbH unten: ENGIE/GNVERT und ITM	Seite 46	Kupferschmid & Faltenbacher, 2018, Satz VDV
Seite 20	links oben: VDV-Schrift 260, E-Bus – Infrastruktur/Ladestellen, Seite 10 oben links unten: VDV-Schrift 260, E-Bus – Infrastruktur/Ladestellen, Seite 10 oben Spalte rechts oben: Stadtwerke Solingen GmbH, Marcus Fey; Spalte rechts unten: Stadtwerke Solingen GmbH		
Seite 21	oben links: HOCHBAHN oben rechts: VDL Bus & Coach GmbH unten: VDV-Schrift 260, E-Bus – Infrastruktur/Ladestellen, Seite 33		
Seite 22	oben: SSB Markus Wiedemann unten: Kupferschmid & Faltenbacher, 2018		
Seite 23	oben links: Linde 2018 oben rechts: Hydrogenics 2016 unten: Kupferschmid & Faltenbacher, 2018		
Seite 24	Sphera (ehemals thinkstep), 2019, Satz VDV		
Seite 26	unten links: Mark Hogenmüller Reutlinger Stadtverkehrsgesellschaft unten rechts: Kölner Verkehrs-Betriebe AG (KVB) Christoph Seelbach Fotografie		
Seite 27	üstra Hannoversche Verkehrsbetriebe AG Martin Bargiel		
Seite 28	links: Stadtwerke Solingen GmbH rechts: Stadtwerke Solingen GmbH		
Seite 29	RVK		
Seite 30	Sphera (ehemals thinkstep), 2019		
Seite 31	Kupferschmid & Faltenbacher, 2018		

Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV)
Kamekestraße 37-39 · 50672 Köln
T 0221 57979-0 · info@vdv.de · www.vdv.de

PARTNER DER INITIATIVE
Zeit für neues Denken und Handeln.



deutschland-mobil-2030.de