

ELEKTROBUSSE IN NRW

Mehr Bewegen.
Mit Strom und Wasserstoff.



Technik und Marktentwicklung



Impressum

Herausgeber: ElektroMobilität NRW

EnergieAgentur.NRW GmbH | Roßstraße 92 | 40476 Düsseldorf

Kompetenzzentrum ElektroMobilität NRW GbR | Karl-Heinz-Beckurts-Str 13 | 52428 Jülich

Mail: info@elektromobilitaet.nrw

Text und Redaktion: EnergieAgentur.NRW GmbH **Gestaltung:** EnergieAgentur.NRW GmbH

Bildnachweis: S. 1: © SWB Bus und Bahn | S. 5: © kupchynskyi12/stock.adobe.com | S. 10: © Siemens AG | S. 11: © Volvo Busse Deutschland GmbH, Bombardier Primove GmbH | S. 12: © Kompetenzzentrum ElektroMobilität NRW GbR | S. 13: © EvoBus GmbH | S. 14: © Van Hool NV | S. 12,23,25: © EnergieAgentur.NRW GmbH | S. 17: © Reuter, D. B., Faltenbacher, D. M. & Schuller, D. O. | S. 18: © Regionalverkehr Köln GmbH (RVK) | S. 19: © EMS, Jülich | S. 20,21: © ZF Friedrichshafen AG | S. 26: © ASEAG Aachener Straßenbahn und Energieversorgungs-AG, Stadtwerke Münster
Statistiken: EnergieAgentur.NRW GmbH nach Daten des Kraftfahrt-Bundesamt 2020 **Stand:** Oktober 2020/EA622

INHALT

<i>Elektromobilität im öffentlichen Personennahverkehr</i>	4
<i>Übersicht Fahrzeugklassen und -varianten</i>	5
<i>Bestand und Neuzulassungen von Kraftomnibussen in Nordrhein-Westfalen und Deutschland</i>	6
<i>Stand der Technik</i>	10
<i>Batterieelektrische Busse - Ladetechnik</i>	11
<i>Batterieelektrische Busse - Traktionsbatterie</i>	12
<i>Brennstoffzellenbusse - Antriebskonzepte</i>	14
<i>Brennstoffzellenbusse - Brennstoffzelle</i>	16
<i>Brennstoffzellenbusse - Tankstellenkonzept</i>	17
<i>Brennstoffzellenbusse - Wasserstofftanks</i>	19
<i>Elektrischer Antrieb</i>	20
<i>Marktentwicklung von Elektrobussen</i>	22
<i>Regionale Erfahrungen in Nordrhein-Westfalen</i>	24
<i>Detaillierte Beschreibung der Busse in exemplarisch ausgewählten Städten</i>	26
<i>Marktbetrachtung</i>	28
<i>Empfehlungen</i>	30

Elektrobusse sind ein wichtiger Baustein für eine nachhaltige Mobilität in urbanen Ballungsräumen.

Der Megatrend Urbanisierung ist weiterhin ungebrochen. Urbane Regionen müssen zukünftig vernetzter und umweltfreundlicher gestaltet sein, so dass die Lebensqualität in den Städten trotz der Zunahme der Bevölkerungsdichte gesteigert werden kann. In Deutschland entfallen circa 110 Milliarden Personenkilometer auf den ÖPNV (inklusive Straßenbahnen und Stadtbahnen). Nahezu die Hälfte davon wird mit Stadtbussen realisiert, die somit in urbanen Ballungsräumen einen großen Anteil am ÖPNV abdecken. Stadtbusse tragen dadurch allerdings auch zur Luftverschmutzung sowie Lärmbelastung bei. Hier sind Elektrobusse im ÖPNV – sowohl batteriebetrieben als auch mit Brennstoffzellenantrieb – einer der Hauptschlüssel, um die Anforderungen hinsichtlich Emissionen und Klimaschutz zu erfüllen: Sie garantieren lokale Emissionsfreiheit in den Städten.

Auch der Fahrkomfort ist im Vergleich zu Dieselmotoren besser, da der elektrische Antrieb für eine vibrationsarme Fahrt bei geringen Lärmemissionen sorgt. Die Wahl des geeigneten Antriebskonzepts wird dann von der Länge der Busrouten, auf denen das Fahrzeug eingesetzt wird, sowie von der zur Verfügung stehenden Infrastruktur (Ladestationen, Wasserstoff-Tankstellen) abhängen.




Einige Verkehrsbetriebe sind in Nordrhein-Westfalen über den ersten positiven Test- und Linienbetrieb hinaus und bauen ihre Flotten nun sukzessive um.

ÜBERSICHT FAHRZEUGKLASSEN UND -VARIANTEN

In der Fahrzeugklasse der Kraftomnibusse gibt es unterschiedliche Typen in verschiedenen Varianten.

Kraftomnibusse sind nach Straßen-Verkehrszulassungs-Ordnung (StVZO) Kraftfahrzeuge zur Personenbeförderung mit mehr als acht Sitzplätzen – außer dem Fahrersitz. In der vorliegenden Veröffentlichung stehen die Stadtbusse der Fahrzeugklasse M3 im Fokus der Betrachtung, da hier das derzeit bevorzugte Einsatzfeld für Elektrobusse liegt. Diese werden als Niederflur-, Gelenk- oder Doppelgelenkbus im Linienverkehr eingesetzt.

Batterieelektrische Stadtbusse werden mittlerweile von nahezu allen bekannten Nutzfahrzeugherstellern angeboten – zum Beispiel Daimler EvoBus, MAN oder VDL. Hersteller von Brennstoffzellenbussen, die bereits zum Einsatz kommen, werden hingegen meistens durch spezialisierte Unternehmen mit bisher geringem Marktanteil in Deutschland entwickelt und produziert, zum Beispiel Van Hool und Solaris. Allerdings wächst auch hier die Zahl der Anbieter deutlich (u.a. Caetano, Wrightbus, Safta).

Fahrzeugklassen	zul.Fzg. GG	Typisches Einsatzgebiet
M2 – Kleinbusse 	Bis unter 5,0 t	Touristische und Linienverkehre mit geringer Nachfrage
M3 – Stadtbusse 	Ab 5,0 t	Linienverkehr in Städten
M3 – Reise- und Überlandbusse 	Ab 5,0 t	Fernlinienbusverkehr, Verbindung urbaner Räume

Varianten M3 Stadtbusse	Kategorie	Eigenschaften
	Niederflurbus	Bis zu 12m lang 21 - 40 Sitzplätze
	Gelenkbus	Ca. 18m lang 45 Sitzplätze
	Doppelgelenkbus	Ca. 25m lang 70 Sitzplätze

BESTAND UND NEUZULASSUNGEN VON KRAFTOMNIBUSSEN IN

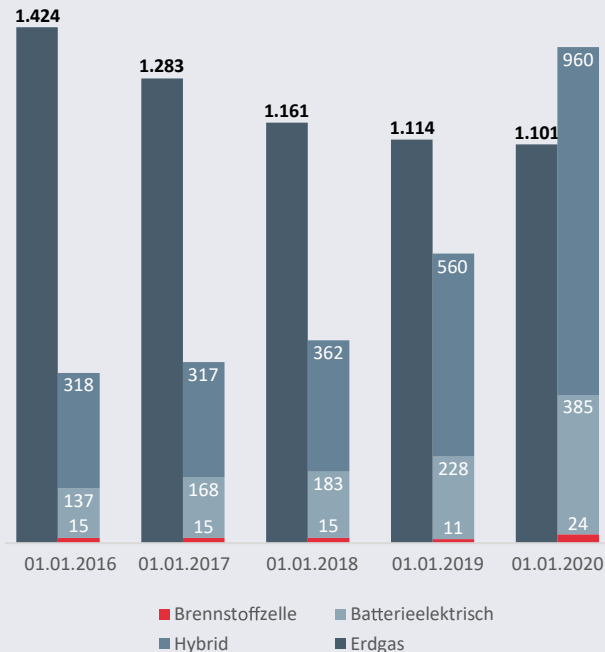
NORDRHEIN-WESTFALEN UND DEUTSCHLAND

Die Elektrifizierung der Busflotten nimmt Fahrt auf.

Der Bestand von Kraftomnibussen mit alternativen Antrieben ist in Summe von Anfang 2016 mit circa 1.750 Fahrzeugen bis Anfang 2020 auf mehr als 2.000 Fahrzeuge angestiegen. Es ist zudem ein Trend erkennbar, dass Erdgasbusse weniger gefragt sind. Der Bestand ist in diesem Zeitraum um mehr als 400 Fahrzeuge zurückgegangen. Das entspricht einer Bestandsreduktion von rund 23 Prozent.

In den vergangenen beiden Jahren hat die Elektrifizierung der Busflotten Fahrt aufgenommen. Der Hybridbusbestand ist von Anfang 2018 bis 2020 um 250 Prozent und der Bestand der batterieelektrischen Busse um 210 Prozent angestiegen. Der Brennstoffzellenbusbestand ist mit 24 Fahrzeugen noch klein, jedoch zeigt sich auch hier nach längerer Zeit ohne Bestandsveränderung eine positive Entwicklung.

Bestand von Kraftomnibussen mit alternativen Antrieben in Deutschland

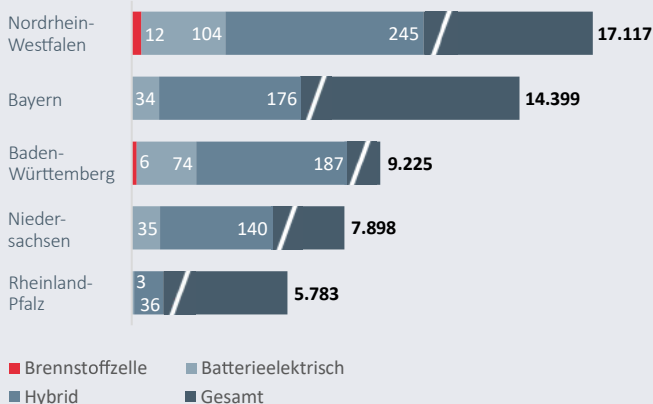


Nordrhein-Westfalen hat den größten Bestand an Kraftomnibussen mit Elektroantrieb.

Im Vergleich der Bundesländer hat Nordrhein-Westfalen zum 01.01.2020 mit 17.117 Kraftomnibussen den größten Bestand. Bayern folgt mit einem Bestand von 14.399 Fahrzeugen auf Rang 2 und Baden-Württemberg mit 9.225 auf Rang 3.

Das Land Nordrhein-Westfalen hat zudem auch absolut den größten Bestand an Dieselhybridbussen (245), sowie an batterieelektrischen Bussen (104) und Brennstoffzellenbussen (12). Dies hebt das Engagement der nordrhein-westfälischen Verkehrsbetriebe hervor, den ÖPNV umweltfreundlicher zu gestalten und dabei eine Vorreiterrolle einzunehmen.

Bestand von Kraftomnibussen in Summe und mit Elektro- oder Hybridantrieb nach Bundesländern am 01.01.2020



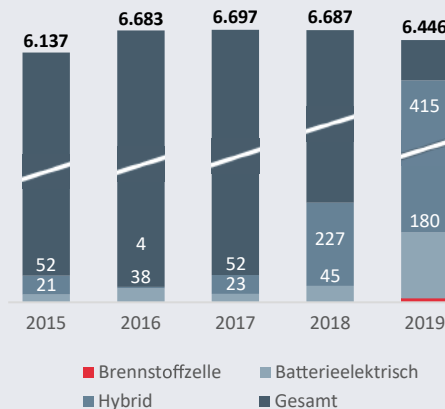
BESTAND UND NEUZULASSUNGEN VON KRAFTOMNIBUSSEN IN

NORDRHEIN-WESTFALEN UND DEUTSCHLAND

Die bundesweiten Neuzulassungen von Kraftomnibussen sind von 2015 bis 2020 auf einem recht konstanten Niveau von circa 6.500. Die Neuzulassungen von Kraftomnibussen mit Elektro- oder Hybridantrieben lagen zwischen 2015 und 2017 recht konstant bei circa 70 Fahrzeugen. Die Zulassungen sind von 23 im Jahr 2017 auf 191 im Jahr 2019 gestiegen – das entspricht einer Verachtfachung der Zulassungszahlen.

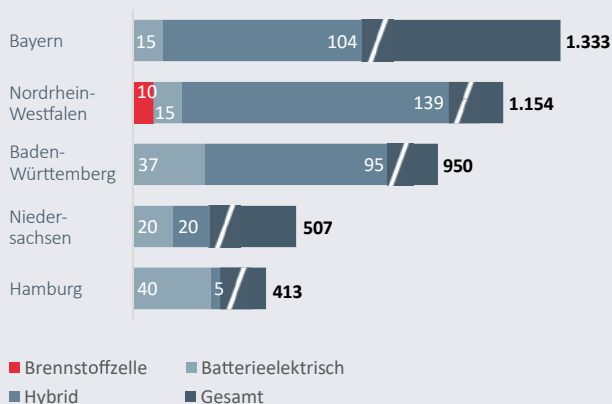
Bei den Hybridbussen zeigt sich das gleiche Bild. 2017 wurden 52 Fahrzeuge und in 2019 insgesamt 450 Fahrzeuge zugelassen – dies entspricht einem Faktor von fast 9. 2016 betrug der Anteil der Kraftomnibusse mit Elektro- oder Hybridantrieb an der Gesamtzulassungszahl lediglich 1 Prozent, im Jahr 2020 bereits 9 Prozent.

Neuzulassungen von Kraftomnibussen in Summe und mit Elektro- oder Hybridantrieb in Deutschland von 2015 bis 2019



Im Vergleich der Neuzulassungen von Kraftomnibussen in den Bundesländern belegte Nordrhein-Westfalen mit 1.154 im Jahr 2019 Rang zwei hinter Bayern mit 1.333 Fahrzeugen. Nordrhein-Westfalen war das einzige Bundesland der fünf zulassungsstärksten Bundesländer, das Brennstoffzellenbusse (10) zugelassen hat. Der Anteil an Elektro- (25) und Hybridbussen (139) an den Gesamtzulassungen war mit circa 14 Prozent in Nordrhein-Westfalen am größten.

Neuzulassungen von Kraftomnibussen nach Bundesländern im Vergleich nach Summe und mit Elektro- oder Hybridantrieb in 2019



STAND DER TECHNIK

Batterieelektrische Busse werden nach Depot- oder Gelegenheitsladern unterschieden.

Der Betrieb von batterieelektrischen Bussen ist bei einem Einsatzgebiet mit planbaren Linien und begrenzten Reichweiten bereits heute technisch gut möglich und sinnvoll. Dabei gibt es zwei unterschiedliche Ladekonzepte:

Depotlader

Batterieelektrische Busse mit einer größeren Batteriekapazität und größerer Reichweite, die den notwendigen Tageseinsatz von maximal 150 bis 200 Kilometer abdeckt, werden in der Regel ausschließlich im Depot außerhalb der Betriebszeit, meist in der Nacht, wieder vollständig aufgeladen. Dabei wird die Ladeinfrastruktur nur auf dem Betriebshof aufgebaut. Die Ladeleistung kann hier meist geringer gewählt werden.

Gelegenheitslader

Werden batterieelektrische Busse als Gelegenheitslader betrieben, werden sie im Linienbetrieb bei jedem Umlauf an oder in der Nähe von Halte- oder an Endhaltestellen geladen. Diese Busse besitzen meist eine kleinere Batteriekapazität, jedoch ermöglicht das Batteriesystem in Verbindung mit dem Ladegerät sehr hohe Ladeleistungen, um so in Kürze genügend Energie bis zum nächsten Ladevorgang zu speichern.

Gelegenheitslader können zusätzlich auch mit Ladeinfrastruktur auf dem Betriebshof geladen werden.

Plug-in

Das sogenannte Plug-in-Laden erfolgt außerhalb des Linienbetriebs. Der Ladevorgang kann zum Beispiel über Nacht an der Ladestation auf dem Betriebshof durchgeführt werden. Die Ladestation zeigt dabei notwendige Informationen an, zum Beispiel Ladezustand oder Reichweite. Sind die Batterien aufgeladen, wird der Ladevorgang automatisch beendet. Zudem kann der aktuelle Ladevorgang häufig über einen Fernzugriff überwacht werden. Wenn der Anschluss gegeben ist, bietet sich zudem eine Vorkonditionierung (d. h. Heizen oder Kühlen des Kraftomnibusses vor Betriebsstart) an, um die Energieabnahme aus der Batterie zur Klimatisierung oder Heizung während des Betriebs zu verringern.



BATTERIEELEKTRISCHE BUSSE - LADETECHNIK

Es werden unterschiedliche technische Lösungen angewendet, um Elektrobusse aufzuladen. Entscheidend für die Auswahl dieser Lösungen ist, ob die Batterie fortlaufend oder gelegentlich und während oder außerhalb des Betriebs aufgeladen werden soll.

Statischer Pantograph

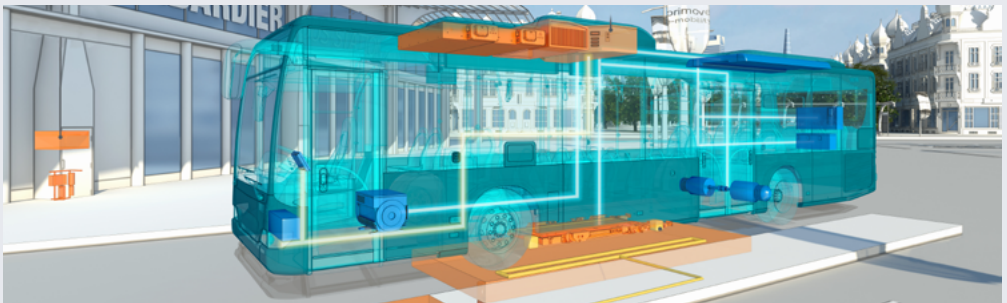
Bei Ladung mittels eines Pantographen wird der Elektrobus während der Standzeit – meist an einer Haltestelle – über einen absenkbaren Pantographen infrastrukturseitig oder einem ausfahrbaren Pantographen fahrzeugseitig mit dem Stromnetz verbunden. Aufgrund der hohen Ladeleistungen bis 600 kW sind kurze Ladedauern möglich, was für den Einsatz von Kraftomnibussen als Gelegenheitslader ideal ist.



Weitere Ladekonzepte

Möglich ist auch ein dynamisches Laden per Pantograph über eine Oberleitung. Bei diesem Konzept ist die Infrastruktur jedoch recht teuer. Eine weitere Möglichkeit ist das berührungslose Laden per Induktion. Dies kann sowohl gelegentlich an Bushaltestellen erfolgen oder kontinuierlich

während der Fahrt. Für das induktive Laden während der Fahrt müssen Induktionsspulen in die Fahrbahn gelegt werden, was hohe Kosten verursacht. Konzepte, in denen ein komplett automatisierter Austausch der Batterie vorgenommen wird, kommen in der Praxis nur sehr vereinzelt vor.

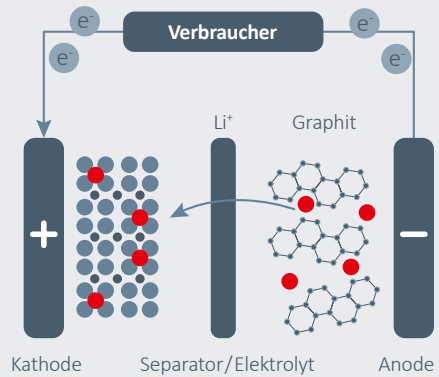


BATTERIEELEKTRISCHE BUSSE - TRAKTIONSBATTERIE

Der Energiespeicher bzw. die Traktionsbatterie ist in vielen Fällen im Dach verbaut.

Dadurch kann der Fahrgastraum stufenlos und großzügiger gestaltet werden. Der Energiespeicher ist aus vielen miteinander verbundenen Batteriemodulen zusammengesetzt, die jeweils aus zahlreichen wiederaufladbaren Zellen bestehen.

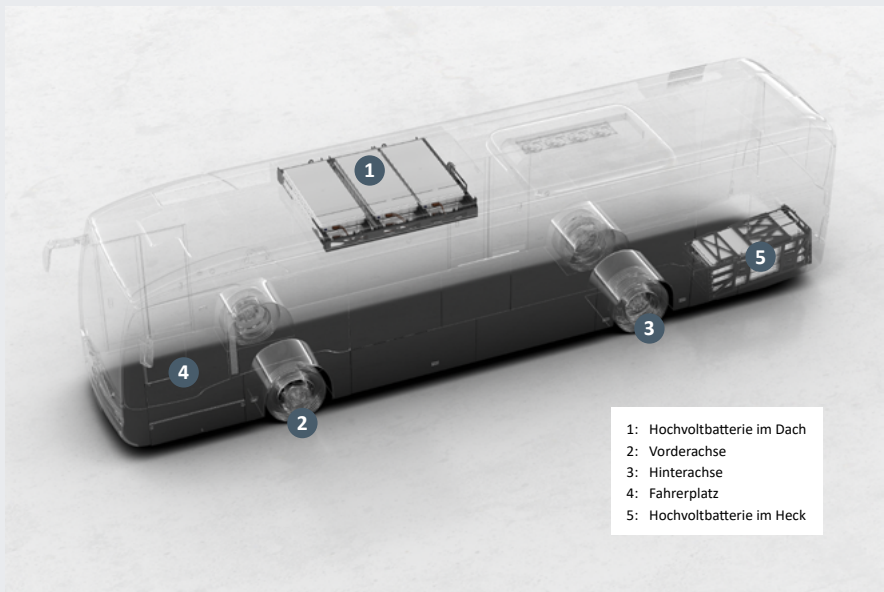
Kommerziell verfügbare Batterien basieren auf der Lithium-Ionen-Technologie. Aufgrund der hohen Energie- und Leistungsdichte haben sich Lithium-Ionen- und Lithium-Polymer-Batterien in der Elektromobilität durchgesetzt. Im Mittelpunkt der Forschung stehen unter anderem die Weiterentwicklung von Lithium-Schwefel- und Lithium-Luft-Batterien, deren Potenzial derzeit noch nicht ausgeschöpft ist.



Die Batterien werden im Gehäuse mit Isolierung und Kühlsystem verbaut und miteinander vernetzt.

Das Batteriemanagementsystem ist die Schnittstelle zwischen Elektrobuss und Energiespeicher. Es steuert die wesentlichen Funktionen der Energiespeicher, zum Beispiel die Spannung bei (Ent-)Ladevorgängen. Außerdem überwacht es den Temperaturhaushalt der Batterie und reguliert die Kühl- und Heizanlage. Dadurch werden die Lebensdauer und die Leistungsabgabe optimiert.

Zur Veranschaulichung der Dimensionen eines Energiespeichers ist auf dem Bild unten eine Hochvoltbatterie, die im Dach des Busses verbaut ist, dargestellt.



BRENNSTOFFZELLENBUSSE - ANTRIEBSKONZEPT

Brennstoffzellenbusse sind lokal emissionsfrei und bieten große Reichweiten.

Bei Brennstoffzellenbussen handelt es sich um lokal emissionsfreie Hybridbusse, die wie batterieelektrische Busse über einen elektrischen Antrieb verfügen. Die dafür notwendige Energie kommt aus dem an Bord gespeicherten Wasserstoff. Daraus wird mittels einer Brennstoffzelle Strom erzeugt, die damit dann den Antriebsstrang versorgt.

Brennstoffzellenbusse werden in zwei Typen aufgeteilt. Zum einen in sogenannte Vollhybrid-Brennstoffzellenbusse, in denen die Brennstoffzelle den überwiegenden Teil der Antriebsenergie erzeugt. Zum anderen gibt es Brennstoffzellen-Range-Extender-Busse, die eine vergleichsweise große Batterie besitzen, deren Reichweite durch eine Brennstoffzelle als Range-Extender (durch kontinuierliches Nachladen der Batterie) vergrößert wird. Beide Typen verfügen als Hauptkomponenten über Brennstoffzelle, Batterie und Drucktanks für den Wasserstoff, unterscheiden sich jedoch in der Dimensionierung.

Vollhybrid-Brennstoffzellenbus

Dieser Brennstoffzellenbus besitzt eine kleinere Batterie mit einer Kapazität von circa 30 kWh, die als Startbatterie und als Energiepuffer für die Energierückgewinnung dient. Die Brennstoffzelle selbst hat eine Leistung von circa 85 kW. Der Wasserstofftank fasst typischerweise 40 kg Wasserstoff. Reichweiten liegen zwischen 350 und 400 km, der Wasserstoffverbrauch liegt je nach Topologie des Einsatzgebiets zwischen 8 und 10 kg/100km.



Brennstoffzellen-Range-Extender-Bus

Bei Brennstoffzellen-Range-Extender-Bussen ist die Speicherkapazität der Batterie mit etwa 250 kWh ähnlich groß wie bei rein batterieelektrischen Bussen. Dabei ist das Brennstoffzellensystem mit einer Leistung von etwa 30 kW und einem Tankinhalt von 15 kg Wasserstoff kleiner ausgelegt und dient der Verlängerung der Reichweite. Somit kann es vorkommen, dass je nach Funktionsweise auf kurzen Strecken die Brennstoffzelle nicht zum Einsatz kommt. Zudem benötigen Brennstoffzellen-Range-Extender-Busse auf dem Busdepot neben einer Wasserstoff-tankinfrastruktur auch eine Ladeinfrastruktur, um die Batterie laden zu können.



- 1: Wasserstofftanks
- 2: Hochvoltbatterie
- 3: Klimaanlage mit Batteriekühlung
- 4: Hauptkühlung
- 5: Bremsmodul
- 6: Dampfabscheidung
- 7: Bordelektronik
- 8: Inverter
- 9: Brennstoffzelle
- 10: Elektromotor

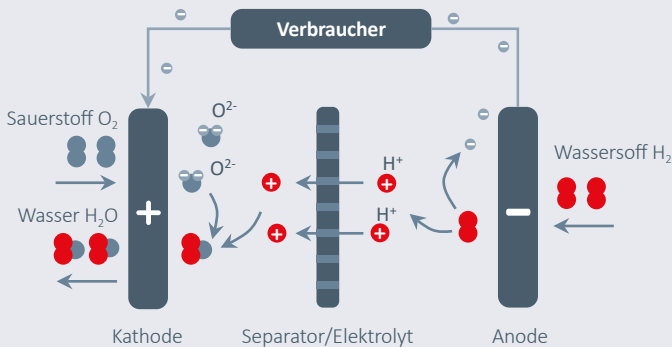
BRENNSTOFFZELLENBUSSE - BRENNSTOFFZELLE

Die Brennstoffzelle ist ein hocheffizienter elektrochemischer Energiewandler.

Die Brennstoffzelle ist ein elektrochemischer Energiewandler. In der Brennstoffzelle reagiert der kontinuierlich zugeführte Wasserstoff mit dem Sauerstoff aus der Luft. Dadurch wird ähnlich einer Batterie ein Gleichstrom bei niedriger Spannung erzeugt. Die restliche Energie, die bei dem chemischen Prozess frei wird, geht in Wärme über, die wiederum zur Beheizung des Fahrzeugs genutzt werden kann.

Um eine verwertbare Spannung für die Nutzung zu erhalten, werden mehrere Brennstoffzellen in Reihe geschaltet.

Typischerweise werden in der Elektromobilität sogenannte Niedertemperatur-Polymermembran-Brennstoffzellen (NT-PEM) eingesetzt. Ein Brennstoffzellensystem besteht neben der Brennstoffzelle aus weiteren Hilfsaggregaten wie beispielsweise der Luftversorgung inklusive Befeuchtung, Druckregelventilen, einem Kühlsystem und dem Umrichter. Je nach Wasserstoffbereitstellung (grauer oder grüner Wasserstoff) sind im Vergleich zu heutigen Dieselbussen sehr niedrige Emissionswerte erreichbar.



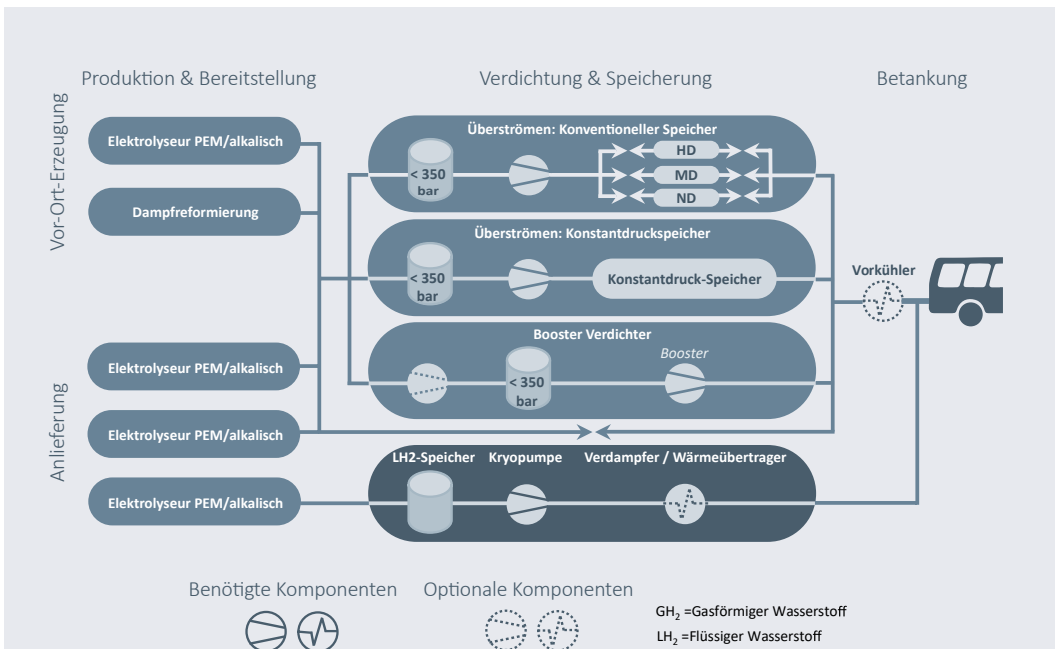
BRENNSTOFFZELLENBUSSE - TANKSTELLENKONZEPTE

Es gibt verschiedene Optionen für die Wasserstoffbereitstellung.

Für den Betrieb von Wasserstoff-Brennstoffzellenbussen wird eine Tankstelle benötigt. Die Bereitstellung des Wasserstoffs kann durch eine Anlieferung oder durch Vor-Ort-Herstellung erfolgen.

Bei der Anlieferung ist die vorherrschende Methode die Anlieferung von gasförmigem oder flüssigem Wasserstoff per LKW. Gasförmiger oder flüssiger Wasserstoff wird üblicherweise per LKW unter 200 bis 500 bar Druck in Trailern angeliefert, die jeweils zwischen 400 und 900 Kilogramm Wasserstoff fassen.

Der Trailer wird bei der Anlieferung mit der Tankstelle verbunden und der Wasserstoff entnommen. Dies kann entweder durch Überströmen in einen Niederdrucktank (ca. 30 bar) erfolgen oder durch direkte Verdichtung in den Hochdrucktank (ca. 500 bar).



BRENNSTOFFZELLENBUSSE - TANKSTELLENKONZEPTE

Aufgrund der hohen volumetrischen Energiedichte können bei der flüssigen Wasserstoff-Anlieferung etwa 3.500 Kilogramm mit einem LKW angeliefert werden. Nachteilig ist der benötigte Energiebedarf zur Verflüssigung, der circa ein Drittel der im Wasserstoff gespeicherten Energie entspricht. Dadurch entstehen höhere Kosten. Somit lohnt sich diese Methode eher für größere Busflotten (z. B. > 50 Busse), bei denen die geringeren Logistikkosten den erhöhten Preis kompensieren können.

Eine Anlieferung per Pipeline ist nur in wenigen Fällen (große Abnahmemengen oder Nähe zum Abnahmepunkt) möglich und auch sinnvoll. Die Pipelineverlegung ist teuer, allerdings vermeidet diese Art der Versorgung gerade bei großen Flotten einen störenden Anlieferverkehr durch Wasserstofftankwagen.

Die Vor-Ort-Herstellung von Wasserstoff kann mittels Elektrolyse oder Dampfreformierung geschehen, wodurch sich die logistischen Aufwendungen für die Wasserstoff-Anlieferung vermeiden lassen. Unter der Elektrolyse von Wasser versteht man die Zerlegung in die einzelnen Komponenten Sauer- und Wasserstoff mithilfe von Strom (Power-to-Gas). Bei der Dampfreformierung werden in einem zweistufigen Prozess aus beispielsweise Erdgas oder Biogas unter hohen Temperaturen und unter Druck Wasserstoff hergestellt.

Der eigentliche Tankvorgang erfolgt ähnlich wie beim Dieselbus über eine Tankkupplung und dauert circa 10 bis 15 Minuten je nach Wasserstoffmenge.

Der Bau einer Wasserstofftankstelle muss wie bei jeder Gastankstelle, behördlich genehmigt werden. Je nach gespeicherter Wasserstoffmenge (< 3to) reicht eine Erlaubnis nach Betriebssicherheitsverordnung.

Darüber hinaus verläuft die Genehmigung nach Bundes-Immissionsschutz-Verordnung (BImSchV). Bei der Planung des Standorts sind zudem Sicherheitsabstände zu benachbarten Gebäuden einzuhalten.



RVK Betankung an der Wasserstofftankstelle Hürth

BRENNSTOFFZELLENBUSSE - WASSERSTOFFTANKS

Die geringe volumetrische Energiedichte von Wasserstoff macht es erforderlich, ihn stark zu komprimieren, um auf angemessenem Raum Wasserstoff auch in größeren Mengen speichern zu können. Die Speicherung unter hohem Druck in Gasdruckbehältern hat sich in diesem Zusammenhang als die bisher sinnvollste Lösung in Busanwendungen gezeigt. Grundsätzlich lassen sich vier verschiedene Bauweisen von Gasdruckbehältern unterscheiden:

- Typ I = konventionelle Gasflaschen aus Stahl
- Typ II = Stahlliner umfangsgewickelt mit Verbundfaser
- Typ III = metallischer Liner vollumwickelt mit Verbundfaser
- Typ IV = Kunststoffliner vollumwickelt mit Verbundfaser

Aus Gewichtsgründen wird in Bussen meist der Gasdruckbehälter Typ IV eingesetzt, der aus mit Verbundfasern vollumwickelten Kunststofflinern besteht. Dieser wird mit einem Betriebsdruck von 350 bar betrieben. Um ausreichend Speicherkapazität zu generieren, werden mehrere dieser Tanks unter dem Dach des Busses platziert. Somit kann ein Wasserstoffbus zwischen 30 und 40 kg Wasserstoff mit sich führen.

Druckbehälter werden einer Vielzahl von Absicherungstests unterzogen, die zu hoher Sicherheit führen. Unter anderem zählen dazu Druck- und Bersttests, Fall- und Beschusstests sowie Leck- und Brandtests. Gasdruckbehälter können den Wasserstoff langfristig verlustfrei speichern.



- | | |
|----|--|
| 1: | Anschlussstück |
| 2: | Dom |
| 3: | Zylinder |
| 4: | Kunststoffliner vollumwickelt mit Verbundfaser |
| 5: | Dom |

ELEKTRISCHER ANTRIEB

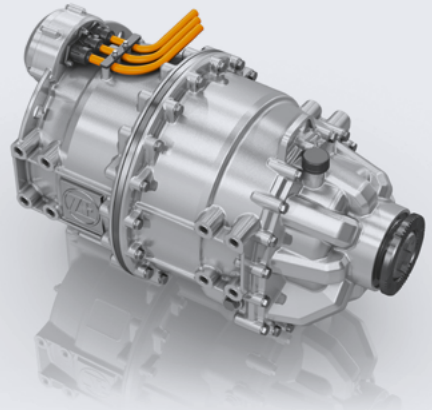
Der Antrieb von Elektrobussen wird entweder zentral oder dezentral ausgelegt.

Beim konventionellen Antrieb werden die Räder wie beim Fahrzeug mit Verbrennungsmotor über eine Antriebswelle und über ein Differentialgetriebe angetrieben. Dadurch lassen sich bisherige Bauformen leichter für Elektrobusse adaptieren. Da der Motor zentral im Bus verbaut

ist, wird er auch nicht Umwelteinflüssen (Verschmutzung, Witterung, Stöße) ausgesetzt. Jedoch herrschen durch den höheren mechanischen Aufwand mehr Reibungsverluste und es besteht mehr Platzbedarf.

Zentraler Antrieb

Der zentrale Antrieb kommt in der Praxis als Konzept für Elektrobusse häufig vor. Dabei wird bei den zweiachsigen Niederflurbussen meist eine Achse mit einem Zentralmotor ausgestattet. Bei Gelenkbussen werden aufgrund des gestiegenen Gewichts zwei Achsen mit einem elektrischen Antrieb ausgestattet, um ähnliche Fahrleistungen wie bei Niederflurbussen zu erreichen. Für Zentralantriebe gibt es verschiedene Automobilzulieferer wie Vossloh Kiepe oder die ZF Friedrichshafen AG, welche diese Art von vollelektrischen Zentralantrieben in ihrem Produktportfolio haben.

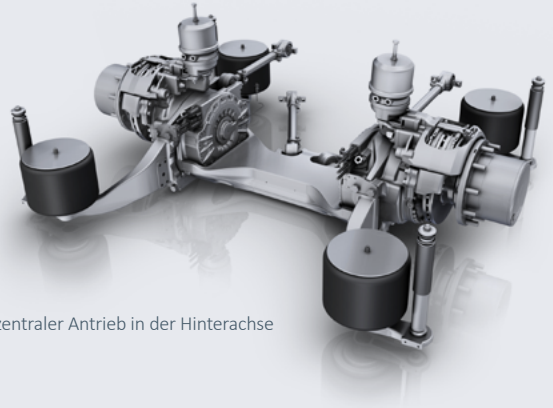


Vollelektrischer Zentralantrieb

Dezentraler Antrieb

Im Gegensatz zum konventionellen Antriebskonzept entfallen beim dezentralen Antrieb die klassischen Antriebsstrangkomponenten (Differentialgetriebe, Antriebswelle) durch die Verwendung von Radnabenmotoren. Dadurch werden der mechanische Aufwand und der Platzbedarf gesenkt. Da die Motoren direkt in der Radnabe platziert sind, lassen sich Allradkonzepte leichter realisieren. Nachteilig sind die derzeitigen Kosten sowie die Gefahr der Verschmutzung von außen.

Für die Weiterentwicklung von dezentralen Antriebskonzepten bietet die Firma ZF aktuelle Lösungen. Konkrete Anwendung finden dezentrale Antriebskonzepte insbesondere bei Elektrobussen, beispielsweise bei der Firma Solaris.



Dezentraler Antrieb in der Hinterachse

MARKTENTWICKLUNG VON ELEKTROBUSSEN

Die zuvor dargestellten Statistiken hinsichtlich der Neuzulassungen von Elektrobussen in Deutschland sowie in den einzelnen Bundesländern verdeutlichen, dass dieser Fahrzeugtyp bereits im realen Betrieb eingesetzt wird. In vielen Großstädten, zum Beispiel Berlin, München, Hamburg oder Köln, setzen Verkehrsbetriebe schon heute Elektrobusse ein.

Teilweise werden die Busse in Feldversuchen erprobt, andererseits gibt es bereits Busse, die im sogenannten Alltagseinsatz auf bestimmten Linien eingesetzt werden. Auch Brennstoffzellenbusse sind in einigen Städten wie Köln, Wuppertal, Hamburg und Stuttgart seit einigen Jahren im Einsatz.



REGIONALE ERFAHRUNGEN IN NORDRHEIN-WESTFALEN

In Nordrhein-Westfalen haben ebenfalls eine Vielzahl an Verkehrsbetrieben Elektrobusse in ihre Flotte integriert. Exemplarisch können hier die Städte Aachen, Münster und Köln aufgeführt werden.

Aachen

Die Aachener Verkehrsbetriebe (ASEAG) betreiben bereits seit 2015 einen Hybridgelenkbus, der zu einem Elektrogelenkbus umgebaut worden ist. Nach den positiven Erfahrungen wurden 12 Niederflur- und weitere 15 Gelenkelektrobusse bestellt, die dann als Depotlader eingesetzt werden.

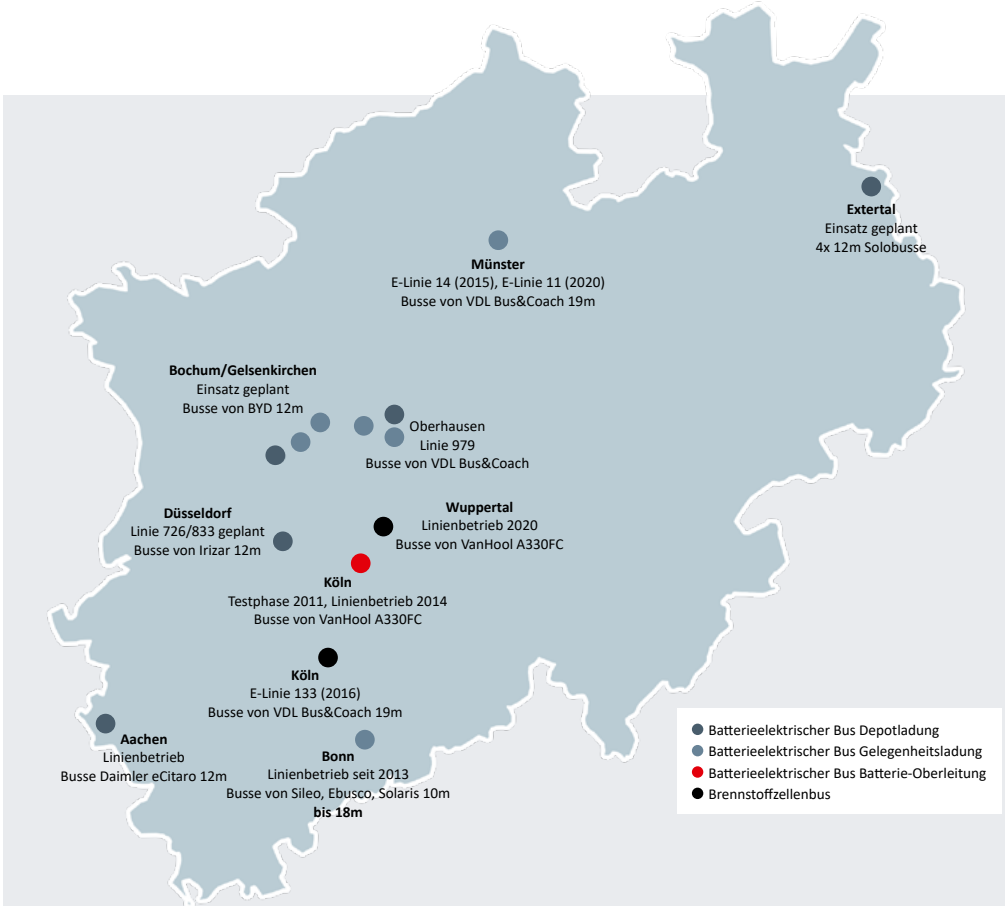
Münster

Seit 2015 werden fünf Elektrobusse als Gelegenheitslader auf der Linie 14 eingesetzt – rund zwölf Kilometer pro Strecke. An den beiden Endhaltestellen wurden Schnellladestationen errichtet. Mit weiteren elf Elektrobusen und zwei Schnelllademasten wird nun auch zusätzlich die Linie 11 auf elektrischen Betrieb umgestellt.

Köln

Die Regionalverkehr Köln GmbH (RVK) hat bereits 2011 zwei Brennstoffzellenbusse eingesetzt. Diese haben im Regionalverkehrseinsatz so überzeugt, dass 35 Van Hool und 15 Solaris Brennstoffzellenbusse bis 2021 in den Linienbetrieb gehen sollen. Weitere 36 Brennstoffzellenbusse sollen für den Oberbergischen Kreis beschafft werden. Zusätzlich werden zwei Wasserstofftankstellen an zwei Bushöfen errichtet, um die Wasserstoffversorgung sicherzustellen.

Die Kölner Verkehrs-Betriebe (KVB) stellten die Bus-Linie 133 zum Fahrplanwechsel im Dezember 2016 auf den Betrieb mit vollelektrischen Gelenkbussen um. Die KVB ist das erste Unternehmen, das eine bestehende Linie komplett auf den Verkehr mit batteriebetriebenen Gelenkbussen umstellte.



DETAILIERTE BESCHREIBUNG DER BUSSE

IN EXEMPLARISCH AUSGEWÄHLTEN STÄDTEN

Typ: Elektrobus / Depotlader



Typ: Elektrobus / Gelegenheitslader



Typ: Brennstoffzellenbus



Hersteller:	Mercedes-Benz / eCitaro
Bus-Typ:	Stadtbus, Variante: Niederflrbus
Länge/Kapazität:	12 Meter / 26 Sitz- und 47 Stehplätze
Techn. Daten*:	Lithium-NMC-Batterie mit 292 kWh Kapazität, zwei radnahe Motoren mit insgesamt 252 kW
Ladeinfrastruktur:	Ladepunkte im Depot mit aktuell 40 kW, später 75 kW
Betrieb:	auf verschiedenen Linien
Einsatzgebiet:	schwerpunktmäßig in der Stadt Aachen unterwegs

Hersteller:	VDL Bus & Coach bv / Citea SLFA-180
Bus-Typ:	Stadtbus, Variante: Gelenkbus
Länge/Kapazität:	18 Meter / 120 Sitzplätze
Techn. Daten*:	luftgekühlte und elektrisch beheizbare Batterie mit einer Kapazität von 288 kWh, Antriebsleistung 210 kW, max. Ladeleistung 350 kW
Ladeinfrastruktur:	3 Lademasten zur Zwischenladung und Ladepunkte im Depot
Betrieb:	Linie 11, Linie 14
Einsatzgebiet:	Münster

Hersteller:	Van Hool / A330 FC
Bus-Typ:	Stadtbus, Variante: Niederflrbus
Länge/Kapazität:	12 Meter / 35 Sitz- und 39 Stehplätze
Techn. Daten*:	Brennstoffzellenleistung 83 kW, Wasserstofftank 38,5 kg bei 350 bar, 210 kW Antriebsleistung, Lithium-Titanat-Oxid-Batterie (LTO) mit 36 kWh Kapazität
Tankstellen:	aktuell eine Fremdtankstelle in Nutzung und zwei eigene Wasserstoff-Tankstellen in Betrieb
Betrieb:	Linie 423 und weitere
Einsatzgebiet:	Köln und Umgebung

* Daten lt. Verkehrsstatistik

MARKTBETRACHTUNG

In einer vergleichenden Betrachtung relevanter Elektrobusse lassen sich einige Gemeinsamkeiten erkennen, wenn man die aktuell im Fahrzeug verwendeten Technologien näher analysiert.

Im Niederflrbus sowie im Gelenkbus kommen als Antriebskonzept überwiegend Asynchronmotoren zum Einsatz. Dies gilt für batterieelektrische Busse und ebenso für Brennstoffzellenbusse. Diese werden zentral sowie dezentral als Radnabenmotoren verbaut. Die elektrische Leistung erstreckt sich bei den Niederflrbusen von 160 bis 300 kW, bei Gelenkbusen von 240 bis 540 kW. Bei den Batterien werden verschiedene Typen von Lithiumbatterien verwendet, hier hängt die Batterieauswahl beispielsweise von der maximalen Ladeleistung ab. Zudem finden erste Feststoff Lithium-Polymer-Batterien Anwendung.

Bei Niederflrbusen sind Kapazitäten von 200 bis 480 kWh und bei Gelenkbusen von 250 bis 640 kWh zu finden, damit sind Reichweiten bis zu 300 km möglich. Bei den Ladeleistungen gibt es eine breite Spanne von 50 bis 450 kW. Geringere Ladeleistungen werden eher über ein Plug-in-Ladekonzept und höhere Ladeleistungen durch einen Pantographen ermöglicht.

Die Brennstoffzellenleistung der Brennstoffzellenbusse beträgt zwischen 30 und 100 kW. Hier ist die Batterie zwischen 15 - 40 kWh eindeutig kleiner ausgelegt, da sie nur als Pufferspeicher dient.

Die verbauten Wasserstofftanks haben einen nutzbaren Wasserstoffinhalt zwischen 25 bis 38 kg, was eine Reichweite von bis zu 400 km ermöglicht.



	Niederflurbus (12m)- batterieelektrisch	Gelenkbus (18m) Batterieelektrisch	Niederflurbus (12m) Brennstoffzelle
Antriebskonzept	Häufig Asynchronmotor, zentral und Radnabe		
elektrische Leistung	160 - 300 kW	240 - 540 kW	160 - 300 kW
Brennstoffzellen- leistung	-	-	30 - 100 kW
Batteriegröße	200 - 300 kWh	250 - 480 kWh	15- 40 kWh
Wasserstoff- tankgröße	-	-	25 - 38 kg
Drehmoment	1.100 - 3.500 Nm	1.800 - 4.200 Nm	1.100 - 3.500 Nm
Reichweite	200 - 300 km	ca. 300 km	300 - 400 km
Höchst- geschwindigkeit	80 km/h	70 - 80 km/h	80 km/h
Ladeleistung	50 - 450 kW	50 - 450 kW	-

EMPFEHLUNGEN

Die vorherigen Ausführungen zeigen, dass Elektrobusse immer häufiger und bei immer mehr Verkehrsbetrieben auf unterschiedlichen Linien eingesetzt werden. Sie bieten eine gute Möglichkeit, die Klimaziele trotz künftig weiter steigender Fahrgastzahlen zu erreichen.

Allgemein können unabhängig von der Entscheidung für batterieelektrischen Bus oder Brennstoffzellenbus folgende Empfehlungen gegeben werden:

- Eine Beschaffung von Elektrobussen im Verbund mehrerer Verkehrsbetriebe ist sinnvoll, da dadurch die Anschaffungskosten gesenkt werden können. Dies ist bei den Beschaffungszyklen zu berücksichtigen.
- Ein gleichzeitiger Aufbau von Wasserstoff- und Ladeinfrastruktur ist aufgrund der hohen Investitionskosten nicht sinnvoll.
- Es gibt Landes- wie auch Bundesförderungen, beispielsweise für die Anschaffung der Elektrobusse, aber auch für die Infrastruktur.



Empfehlungen bei der Einführung von batterieelektrischen Bussen:

- Die Reichweite der Elektrobusse ist maßgeblich abhängig von der Außentemperatur und dem Klimatisierungskonzept. Dies gilt es zu berücksichtigen.
- Der Infrastrukturausbau entlang der Strecke oder im Busdepot ist frühzeitig zu planen und bestenfalls auf eine Lade-technik zu beschränken.
- Eine Vorklimatisierung des Bus-Innenraums mit geschlossenem Ladekabel im Busdepot verlängert die Reichweite im Winter.
- Die Dimensionierung des Netzanschlusses für die Ladeinfrastruktur muss durch den Energieversorger geprüft werden.

Empfehlungen bei der Einführung von Brennstoffzellenbussen:

- Der Infrastrukturaufbau (H₂-Tankstellen) sollte in der Kapazität dem Aufbau der Fahrzeugflotte angepasst sein.
- Der Flächenbedarf für die Wasserstoffinfrastruktur, die zwischen 400 und 1100 m² bei einer Flotte von 5 bis 50 Fahrzeugen beträgt, ist zu berücksichtigen.
- Wasserstofftankstellen unterliegen Sicherheitsvorschriften, die baulich umgesetzt und abgenommen werden müssen.
- Ein Elektrolyseur benötigt einen Netzanschluss, der pro benötigtem Kilogramm Wasserstoff je Tag etwa 2,6 kW Leistung liefern muss.

ElektroMobilität NRW

ElektroMobilität NRW ist eine Dachmarke des NRW-Wirtschaftsministeriums. Unter dieser Marke werden sämtliche Elektromobilitäts-Aktivitäten des Landes gebündelt. Unter diesem Dach arbeiten das Kompetenzzentrum ElektroMobilität NRW und die EnergieAgentur.NRW im Auftrag des NRW-Wirtschaftsministeriums an der Fortentwicklung der Elektromobilität in NRW – gefördert von den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE).

Elektromobilität ist im Koalitionsvertrag der Landesregierung NRW ein explizites Fokusthema. Nordrhein-Westfalen hat das Ziel, Vorreiter der Elektromobilität in Deutschland zu werden.

ElektroMobilität NRW ist der erste Ansprechpartner für Elektromobilität in Nordrhein-Westfalen.

Partner:

EnergieAgentur.NRW 



Gefördert durch:

Die Landesregierung
Nordrhein-Westfalen



EUROPÄISCHE UNION
Investition in unsere Zukunft
Europäischer Fonds
für regionale Entwicklung