



Abb. 1: Der Verkehrsbetreiber Rebus setzt derzeit mehr als 50 Brennstoffzellenbusse im täglichen Betrieb in Güstrow und Rostock ein. Foto: FNVK

Brennstoffzellen-Busse: Der Weg zum emissionsfreien öffentlichen Nahverkehr

Oben Uluc

Deutschland hat in den vergangenen Jahren große Fortschritte bei der Elektrifizierung seiner städtischen Busnetze gemacht. Doch während die einfacheren innerstädtischen Korridore inzwischen weitgehend auf batterieelektrischen Betrieb umgestellt sind, beginnt die eigentliche technische und wirtschaftliche Bewährungsprobe jetzt – auf den längeren, bergigen, stark frequentierten und ländlichen Linien, die ihren Fahrplan bei jedem Wetter, in jedem Gelände und unter allen Depotbedingungen zuverlässig einhalten müssen. Brennstoffzellen-Elektrobusse (FCEBs) sind dabei längst keine theoretische Ergänzung mehr: In Deutschland beweisen sie bereits heute, dass der Wasserstoffantrieb die praxiserprobte, emissionsfreie Lösung für genau diese anspruchsvollen Einsatzbereiche ist.

Derzeit sind in Deutschland rund 500 Brennstoffzellenbusse im Einsatz – 410 davon ausgerüstet mit Ballard-Brennstoffzellen.

Sie machen das Land zu einem europäischen Vorreiter im wasserstoffbetriebenen öffentlichen Nahverkehr. Viele dieser Flotten sind bereits seit über fünf Jahren im täglichen Betrieb und liefern wertvolle Praxiserfahrungen und Leistungsdaten. Diese Erkenntnisse verändern die Diskussion über Dekarbonisierung von Busflotten grundlegend und zeigen, wie Brennstoffzellentechnologie Reichweite, Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit über den gesamten Lebenszyklus hinweg vereint – und damit den Weg für emissionsfreie Mobilität im großen Maßstab ebnet.

Warum Brennstoffzellenbusse für Deutschlands Verkehrsnetze wichtig sind

Batteriebusse haben sich dort bewährt, wo die Linien kurz, planbar und die Depots mit ausreichender Netzkapazität für das Laden über Nacht oder Zwischenladungen ausgestattet sind. Die verbleibenden, anspruchs-

volleren Strecken weisen jedoch andere Merkmale auf:

- lange Fahrstrecken oder Betriebszeiten,
- höhere Durchschnittsgeschwindigkeiten und begrenzte Fenster für Ladezeiten,
- hügelige Landschaft und hohe Anforderung an Heizung beziehungsweise Klimatisierung (kalte Winter, heiße Sommer),
- Depots mit begrenztem Platz, unzureichender elektrischer Kapazität oder kostspieliger Netzerweiterung.

Auf diesen Linien stehen Betreiber vor schwierigen Entscheidungen: überdimensionierte Batterien, die das Fahrgastgewicht verringern und die Kosten erhöhen; teure Schnelllader entlang der Strecke; oder betriebliche Kompromisse wie reduzierte Taktung oder der Einsatz von Diesel-Hybrid-Fahrzeugen. FCEBs beseitigen viele dieser Einschränkungen: Mit Reichweiten von 350–450 km, Tankzeiten unter zehn

Minuten und konstanter Leistung über das ganze Jahr hinweg sind sie eine echte Alternative für Dieselbusse – selbst auf den schwierigsten Linien.

Praxisdaten deutscher Flottenbetreiber wie RVK Köln oder WSW Wuppertal zeigen einen Wasserstoffverbrauch von etwa 6–9 kg H₂ pro 100 km bei hoher Fahrzeugverfügbarkeit – Werte, die die Erwartungen der Busbetreiber erfüllen.

Betriebliche Stärken, die Städte und Betreiber schätzen

Aus Sicht der Betreiber zählen vor allem drei Faktoren: Verfügbarkeit, Planbarkeit und minimale Betriebseinschränkungen.

- **Hohe Verfügbarkeit und einfache Depotlogistik:** Wasserstoffbetankung erfordert deutlich weniger elektrische Infrastruktur im Depot als das Schnellladen großer Batteriebusflotten. Für räumlich oder netztechnisch eingeschränkte Depots lässt sich eine skalierbare Wasserstoffversorgung mit geringeren Investitionen realisieren als aufwendige Netzerweiterungen und Hochleistungslader.
- **Reichweite und Planbarkeit:** Dank großer Reichweiten und schneller Betankung lassen sich Fahrzyklen nahezu identisch zum Dieselbetrieb planen. Diese Planbarkeit reduziert die Anzahl benötigter Reservefahrzeuge und vereinfacht den Busbetrieb.
- **Wetterunabhängige Leistung:** Praxiserfahrungen in Deutschland zeigen, dass FCEBs auch bei extremen Temperaturen zuverlässig Reichweite und Leistung bringen – ohne zusätzliche Dieselheizungen oder Einbußen bei der Fahrzeugverfügbarkeit.

Deutschland: Vom Pilotprojekt zum kommerziellen Busbetrieb

Deutschland profitiert heute von EU-Projekten (JIVE/JIVE-2) und kommunalen Pionierbetrieben, die längst über Pilotphasen hinaus sind. Große Betreiber wie RVK Köln (160 Busse) und WSW Wuppertal berichten von hoher Verfügbarkeit, positiver Resonanz bei Fahrgästen und Fahrpersonals sowie von Fahrplänen, die sich auf große Flotten skalieren lassen.

Der wachsende Markt an OEMs, die Wasserstoffbus-Plattformen anbieten (etwa Solaris, Wrightbus, Nesobus oder MCV),



Zum Autor

Oben Ullrich ist Vice President, Sales & Marketing bei Ballard Power Systems. Er leitet die globale Vertriebs- und Marketingorganisation in den zentralen Märkten des Unternehmens, darunter Transport, Mobilität, stationäre, Off-Road sowie maritime Anwendungen. Sein Verantwortungsbereich umfasst auch den Aufbau starker Geschäftsbeziehungen mit Erstausrüstern (OEMs) und strategischen Partnern weltweit. Mit über 30 Jahren internationaler Erfahrung in schnell wachsenden Technologieunternehmen, darunter Siemens AG und Cominco Inc., verfügt Ullrich über umfassende Expertise bei der Einführung nachhaltiger Technologien sowie deren Wachstum in internationalen Märkten.

verschafft deutschen Verkehrsbetrieben vielfältige Beschaffungsoptionen und stabile Lieferketten. Gleichzeitig bauen nationale und regionale Wasserstoffproduzenten Logistik und Infrastruktur für wachsende Flotten konsequent aus.

Wie Modultechnik die Gesamtkosten verändert

Die Gesamtbetriebskosten (Total Cost of Ownership, TCO) bleiben das entscheidende Kriterium bei der Technologieauswahl zur Dekarbonisierung von Busflotten. Zwar lagen FCEBs historisch über Diesel- und teils auch Batteriealternativen – doch diese Lücke schließt sich zunehmend durch Fortschritte auf mehreren Ebenen:

- **Brennstoffzellenmodul-Design:** Neue Produkt-Generationen der Ballard FCmove®-Familie und hier das speziell für den Busbetrieb entwickelte FCmove®-SC-Modul bieten eine höhere Leistungsdichte, vereinfachte Fahrzeugintegration (inklusive integriertem DC/DC-Wandler), höhere Betriebstemperaturen und reduzierten Teileeinsatz – alles Faktoren, die Integrations- und Wartungskosten senken und die Flotteneffizienz steigern.
- **Hybride Auslegung:** Die optimale Abstimmung von Brennstoffzellenleistung und Batteriegröße auf den realen Einsatzzyklus beeinflusst Wasserstoffverbrauch, Batterieverschleiß und Lebenszykluskosten maßgeblich. Routenbasierte Simulationen – inklusive Klima- und Zuladungseinflüssen – sind dabei der Schlüssel einer kosteneffizienten Fahrzeugkonfiguration.
- **Vorausschauende Wartung und Telematik:** Durch Telemetriegestützte Instandhaltung lassen sich Wartungs- und Ausfallkosten um bis zu 20–30 Prozent senken. Ballard-Simulationen zeigen, dass sich durch die Kombination aus modularem Design und Wartungsvorhersage die Betriebskosten pro Kilometer deutlich reduzieren lassen.

■ **Wasserstoffversorgung und Infrastruktur:** Die Wirtschaftlichkeit hängt eng mit der Betankungsinfrastruktur zusammen. Bei Flottengrößen ab etwa 30–50 Bussen rechnet sich eine Wasserstofftankstelle im Depot gegenüber dezentralen Schnellladern. Langfristige Lieferverträge und regionale Konsortien sorgen zudem für stabile Preise.

All diese Faktoren zusammen bringen auch die anspruchsvollen Linien in Deutschland schneller in Richtung Wirtschaftlichkeitsparität, anders als es reine Komponentenvergleiche vermuten lassen.

Wasserstoff ist in Deutschland verfügbar

Für die Mobilität in Deutschland konzentriert sich die Wasserstoffindustrie auf den Aufbau eines flächendeckenden Tankstellennetzes (HRS) und die Sicherstellung konstanter Wasserstoffversorgung, insbesondere für Nutzfahrzeuge wie Busse und Lkw. H₂ Mobility betreibt den größten Teil des öffentlichen HRS-Netzes, das Ende 2024 113 leistungsstarke Tankstellen (über 90 Prozent Verfügbarkeit) umfasst. Die Gesamtzahl der Tankstellen ist jedoch im Vergleich zur Ladeinfrastruktur für batteriebetriebene Elektrofahrzeuge nach wie vor begrenzt, und einige Tankstellen werden speziell für den Schwerlastverkehr umgerüstet.

Die Wasserstoffversorgung wird zunehmend durch Erzeugung vor Ort und mobiler Anlieferung im Rahmen langfristiger Lieferverträge sichergestellt. Die Wasserstoffindustrie konzentriert sich dabei auf die Produktionserhöhung, Kostensenkungen und einem ausgewogenen Lieferverhältnis an Transportgewerbe und Industrie. Wasserstoffproduktion ist ein Hauptpfeiler der deutschen Dekarbonisierungsstrategie, insbesondere für anspruchsvolle öffentliche Verkehrsflotten, die eine schnelle Betankung benötigen, um große Reichweiten zu erzielen.

Germany to become a hydrogen country

62 German hydrogen projects are to benefit from public funding.*



Abb. 2: Seit 2021 haben 62 groß angelegte Wasserstoffprojekte öffentliche Fördermittel erhalten und sind Teil der Nationalen Wasserstoffstrategie Deutschlands geworden. Grafik: BMWi

Der jährliche Wasserstoffbedarf in Deutschland liegt derzeit bei etwa 55 TWh (hauptsächlich für die chemische Industrie, Raffinerien und andere industrielle Anwendungen). Deutschland verfügt über ein hohes Potential in der Wasserstofftechnologie. So haben beispielsweise Siemens Energy und Air Liquide in Deutschland die Produktion von Elektrolyseuren im Gigawattbereich aufgenommen. Die deutsche Regierung hat erhebliche Fördermittel bereitgestellt, darunter rund 4,6 Mrd. Euro für 23 Projekte im Bereich grüner Wasserstoff mit einer Produktionskapazität von rund 1,4 GW, hohen Speicherkapazitäten und mehreren Pipelines. Im Rahmen der aktualisierten Nationalen Wasserstoffstrategie (2023) strebt Deutschland an, bis 2030 mindestens 10 GW Elektrolyseurkapazität zu installieren.

Ballards Partnerschaftsmodell „Here for Life“

Technologie ist notwendig, reicht aber allein nicht aus, um in Deutschland großflächig erfolgreich zu sein. Vom ersten Einsatz

des Fahrzeuges über die Modernisierung bis zum Lebensdauerende bedarf es einer Partnerschaft, die OEMs und Fahrzeugbetreiber unterstützt. Zu den wichtigsten Elementen eines effektiven Lebenszyklusmodells gehören:

- **Unterstützung bei der Antriebskonfiguration und Integration für OEMs**, um Integrationszeiten zu verkürzen, Entwicklungsaufwand für maßgeschneiderte Fahrzeuge zu reduzieren und Schnittstellen zu standardisieren,
- **Schulung der Betreiber und Betriebsanalyse**, damit das Wartungsteam und die Flottendisponenten vom ersten Tag an einen optimalen Betrieb erzielen,
- **Telemetrie- und vorausschauende Wartung**, für planbare Wartungszyklen basierend auf aktuellen Betriebsdaten anstelle von reaktiven Reparaturen,
- **Stack-Erneuerung und Wartungsfreundlichkeit** für eine planbare Modul-Lebensdauer und der Option Stacks vor Ort zu erneuern. Die Fahrzeug-Nutzungsdauer wird verlängert und die Kosten für einen eventuellen Fahrzeugtausch werden gesenkt.

Ballards Erfahrungen mit über 888 Bussen auf Europas Straßen und die Zusammen-

arbeit mit Bus-OEMs bei der Integration zeigen, wie ein Hersteller von Brennstoffzellenmodulen ein aktiver Lebenszykluspartner anstatt eines einmaligen Lieferanten sein kann. Dieser „Here for Life“-Ansatz reduziert Risiken, vereinfacht Angebotsauswertungen und bietet Betreibern eine bessere Brennstoffzellenleistung und -verfügbarkeit.

Praktische Beschaffungs- und Depotempfehlungen für deutsche Busetreiber

- **Routenbasierte Konfiguration:** Auswahl des Antriebsstrangs basierend auf gemessenen Arbeitszyklen über alle Jahreszeiten hinweg (HVAC, Nutzlast, Geschwindigkeitsprofile). Standardisierte Simulationen in Ausschreibungen helfen, Vergleiche zu ziehen.
- **Lebenszyklus-KPIs in Ausschreibungen:** Betriebszeit, MTTR, MTBF und genaue vorhersagbare Maßnahmen sollten vertragliche Bestandteile sein – keine optionalen Zusatzleistungen.
- **Design mit Blick auf Reproduzierbarkeit:** Standardisierte Antriebsspezifikationen und modulare Integration beschleunigen die Lernkurven der Hersteller und senken die Integrationskosten pro Fahrzeug.
- **Wasserstoffversorgung in großem Maßstab:** Wasserstoffnutzung von Depots und regionalen Konsortien sollten gemeinsam geprüft und langfristige Wasserstoffverträge gesichert werden, um die Kraftstoffkosten zu stabilisieren.
- **Antriebserneuerung als Teil der Lebenszyklusplanung:** Die Lebensdauer der Module und die Möglichkeiten zur Erneuerung vor Ort sollten bei der Planung und Beschaffung berücksichtigt werden.

Politische Implikationen

Für Städte und regionale Regierungen, die sich für die Dekarbonisierung von Busflotten engagieren, beschleunigen gezielte politische Hebel die Einführung, ohne dabei die Märkte zu verzerren:

- **Investitionsunterstützung mit Fokus auf Vorreiter Betriebe und Wasserstoff-Hubs**, um die Infrastruktur schneller auszubauen,
- **betriebliche Anreize oder vorübergehende Wasserstoffpreisgarantien**, um Kraftstoffkostenlücken zu überbrücken, während die Produktion ausgebaut wird,
- **Standardisierungsinitiativen**, die Telemetrie-/KPI-Anforderungen und modulare Schnittstellen festlegen, um Integrationsprobleme zu reduzieren.

1) BMWi-Newsletter Energiewende, Deutschland auf dem Weg zum Wasserstoffland.



Abb. 3: Derzeit sind mehr als 400 Brennstoffzellenbusse auf deutschen Straßen im Einsatz, darunter die 46 Fahrzeuge umfassende Flotte von Solaris in Köln.

Foto: Solaris Bus & Coach

Fazit – ein pragmatischer Weg für Deutschlands anspruchsvollste Strecken

Die Herausforderung für Deutschland bei der Dekarbonisierung besteht nicht darin,

ob Brennstoffzellenbusse funktionieren – der Einsatz in der Praxis zeigt, dass sie funktionieren –, sondern darin, wie schnell der öffentliche Nahverkehr Dieselfahrzeuge auf allen Strecken ohne Beeinträchtigung des Busbetriebs ersetzen kann. Die Ant-

wort ist pragmatisch: Batterieelektrische Busse sollten dort eingesetzt werden, wo sie sich betrieblich und wirtschaftlich bewährt haben (auf innerstädtischen Kurzstrecken), und FCEBs dort, wo Reichweite, Betankungsgeschwindigkeit und ganzjährige Zuverlässigkeit am wichtigsten sind.

Werden Busflotten mit Hilfe von Streckensimulationen, Lebenszyklus-Engineering, telemetriegestützter Wartung und strategischer Wasserstoffbeschaffung geplant, bieten sie ein solides und ausbaufähiges Potential für emissionsfreien Busbetrieb auf Deutschlands anspruchsvollsten Korridoren.

Angesichts der wachsenden Zahl von FCEB-Flotten in deutschen Städten, ist die technische Entscheidung zunehmend untrennbar mit der Lebenszykluspartnerschaft verbunden. Wenn Weiterentwicklungen bei Brennstoffzellenmodulen mit realen Betriebsdaten und vorausschauender Wartung einhergehen, sinken das Betriebsrisiko und die Gesamtbetriebskosten – und deutsche Transportunternehmen erhalten leistungsstarke und effiziente Fahrzeuge für einen emissionsfreien ÖPNV.

Zusammenfassung/Summary

Brennstoffzellen-Busse:

Der Weg zum emissionsfreien öffentlichen Nahverkehr

Deutschland verfügt über fortschrittliche batterieelektrische Busse, aber lange, hügelige Strecken, extreme Wetterbedingungen und begrenzte Depotkapazitäten stellen nach wie vor eine Herausforderung dar. Brennstoffzellen-Elektrobusse bieten eine bewährte Lösung zur Dekarbonisierung. Derzeit sind in Deutschland etwa 500 Wasserstoffbusse im Einsatz, darunter 410 mit Ballard-Brennstoffzellen. Brennstoffzellen-Elektrobusse bieten eine große Reichweite, schnelle Betankung, hohe Verfügbarkeit und ganzjährige Zuverlässigkeit. Sinkende Kosten, verbesserte Technologie und der Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur unterstützen die Skalierung; und eine pragmatische Mischung aus batterieelektrischen Bussen für kurze Strecken und Brennstoffzellen-Elektrobusse für anspruchsvolle Dienste ebnet den Weg zu einem vollständig emissionsfreien öffentlichen Nahverkehr.

Fuel cell buses:

The path to emission-free public transport

Germany has advanced battery-electric buses, but long, hilly routes, extreme weather, and limited depot power remain challenging. Fuel cell electric buses offer a proven decarbonized solution. About 500 hydrogen buses now operate in Germany, including 410 with Ballard fuel cells. Fuel cell electric buses provide long range, fast refueling, high availability, and year-round reliability. Falling costs, improved technology, and expanding hydrogen infrastructure support scale-up; and a pragmatic mix of battery-electric buses for short routes and fuel cell electric buses for demanding services open the path to fully zero-emission public transport.