

thinkstep

# Wasserstoffmobilität bei Linienbussen

**Whitepaper**

# Wasserstoffmobilität bei Linienbussen

Die Umstellung der größtenteils dieselbetriebenen kommunalen und regionalen Busflotten auf lokal emissionsfreie Antriebe gilt als wichtiges Instrument zur Reduktion der verkehrsbedingten Schadstoffemissionen. Bei Verwendung von grünem Strom bzw. grünem Wasserstoff trägt dies zudem wesentlich zur Senkung der Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors und damit zur Umsetzung des Pariser Klimaabkommens bei.

## Welche Antriebsvarianten gibt es? Wie unterscheiden sie sich?

Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) sind durch die direkte Stromnutzung energetisch die sinnvollste Variante, weisen jedoch trotz stetig größer werdender Batteriekapazitäten immer noch erhebliche Einschränkungen hinsichtlich der Reichweite auf. Eine Zwischenladung auf der Strecke ist häufig aus betrieblichen Gründen schwierig. Die dafür notwendige Anschlussleistung von bis zu 450 kW stellt die Busbetreiber zudem vor gänzlich neue Herausforderungen.

Eine dazu alternative Variante sind wasserstoffbetriebene Fahrzeuge, bei denen Wasserstoff in der Regel in einer Brennstoffzelle zu Strom umgewandelt wird. Diese Umwandlung ist jedoch verlustbehaftet, somit aus energetischer Sicht nicht die beste Variante. Aufgrund der ho-

### Der Wasserstoffverbrennungsmotor:

Aktuell entwickelt das Münchner Start-up KEYOU eine Alternative zum Brennstoffzellenantrieb: Den H<sub>2</sub>-Verbrennungsmotor basierend auf einem klassischen Dieselmotor. Bei der Verbrennung entstehen kaum Stickoxidemissionen (deutlich unter Euro VI-Niveau) sowie lokal keinerlei CO<sub>2</sub>-Emissionen. Gegenüber der Brennstoffzelle ist der Verbrauch aktuell um ca. 20 % höher, es werden aber gleichzeitig ca. 40 % geringere Anschaffungskosten erwartet. Damit kann der H<sub>2</sub>-Verbrennungsmotor eine echte Alternative zum Brennstoffzellenantrieb darstellen. Noch befindet er sich allerdings in keiner Fahrzeuganwendung, die weitere Entwicklung bleibt somit abzuwarten.

hen Energiedichte des Wasserstoffs können mit einer Tankfüllung aber bereits 300 - 400 km Reichweite erzielt werden, was für die meisten Umläufe ausreichend ist. Einige Hersteller haben zudem batterieelektrische Fahrzeuge mit einer Brennstoffzelle zur Reichweitenverlängerung angekündigt, was darauf abzielt, die Vorteile beider Antriebsvarianten zu vereinen. Allen gemeinsam ist die Tatsache, dass die Fahrzeuge lokal keinerlei Schadstoffe emittieren - Stickoxidemissionen sind somit kein Thema.

## **Diesel und Wasserstoff – die Allrounder**

Der Dieselfahrzeug ist für die allermeisten Busbetriebe die Standardtechnologie: Hohe Reichweiten, in wenigen Minuten betankbar, eine über Jahre erprobte Technologie und damit einhergehende hohe Verlässlichkeit. Während der batterieelektrische Antrieb speziell in punkto Reichweite und Energieversorgung (Ladezeiten) Schwächen hat, kann der Wasserstoffantrieb aus betrieblicher Sicht punkten. Anfängliche Kinderkrankheiten hinsichtlich der Verfügbarkeit sind nahezu ausgeräumt und Tankzeiten von weniger als zehn Minuten sind heute schon Standard. Mehrere Projekte auf EU-Ebene (CUTE, HyFleet:CUTE, CHIC) haben die Praxistauglichkeit der Technologie unter Beweis gestellt. Mit JIVE und JIVE 2 zielen aktuelle Projekte darauf ab, höhere Stückzahlen im regulären Linienbetrieb einzusetzen. Der bestehende Betriebsablauf kann dabei nahezu identisch fortgeführt werden. Wasserstoffbetriebene Fahrzeuge sind damit schon heute in vielen Anwendungen ein gleichwertiger Ersatz für Dieselfahrzeuge.

**Wasserstoffbetriebene Fahrzeuge sind schon heute in vielen Anwendungen ein gleichwertiger Ersatz für Dieselfahrzeuge.**

## Die Tankinfrastruktur

Grundsätzlich bedarf jede alternative Antriebstechnologie einer passenden Infrastruktur: Elektrobusse benötigen Lademöglichkeiten – sei es über Pantographen, induktiv oder über einen Stecker - und einen entsprechenden Netzanschluss. Für Wasserstoffbusse muss eine Wasserstofftankstelle errichtet werden. Aus sicherheitstechnischer Sicht sind die hohen Drücke in der Tankstelle (ca. 500 bar) kein Problem. Kritische Bauteile wie die Kompressoren werden zudem ständig weiterentwickelt und zeichnen sich mittlerweile durch eine hohe Verfügbarkeit und Betriebssicherheit aus. Kritisch könnte es bei der notwendigen Fläche werden. Viele Busdepots sind bereits heute eng, Platz ist Mangelware. Mit einem weiteren Ausbau des ÖPNV wird sich diese Situation wohl nicht entspannen. Eine Wasserstofftankstelle nimmt mit entsprechenden Sicherheitsabständen je nach Kapazität gut und gerne einige hundert Quadratmeter ein. Dies sollte bei der Konzeptionierung beachtet werden. Lösungen hierzu gibt es: Beispielsweise können Komponenten wie Wasserstoffspeicher übereinander positioniert werden. Das spart Platz in der Fläche. Bei entsprechender Flottengröße kann sich Flüssigwasserstoff lohnen, welcher gekühlt auf  $-253^{\circ}\text{C}$  eine deutlich höhere Energiedichte aufweist als gasförmiger Wasserstoff, was den Platzbedarf ebenfalls deutlich reduziert.

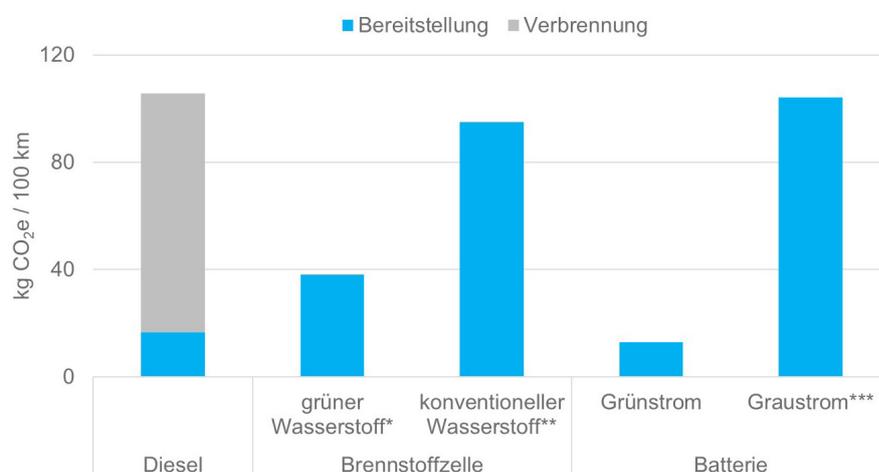
Kurzum: Aus betrieblicher Sicht (Tankzeit, Tankvorgang) sind Diesel- und Wasserstoffbusse vergleichbar. Die Wasserstofftankstelle selbst muss aufgrund der Eigenschaften von Wasserstoff (v.a. Energiedichte und Speicherfähigkeit) spezifisch auf die Bedürfnisse des Busbetriebes und die lokalen Randbedingungen angepasst werden. Lösungen hierzu gibt es zuhauf. Ein weiter wichtiger Aspekt sind die anfallenden Investitionskosten. Hier gibt es verschiedene Modelle. So kann beispielsweise eine Tankstelle vom Busbetrieb gekauft und auch betrieben werden oder man überlässt den Betrieb einschlägigen (Gasversorgungs-) Unternehmen. Auch fullservice Verträge sind möglich, bei denen der Tankstellenhersteller die Investition übernimmt und entsprechende Abnahmemengen seitens des Busbetriebs vertraglich festgelegt werden.

**Überkapazitäten der Tankstelle wirken sich vor allem bei kleinen Tankstellen überproportional auf die Kosten aus.**

Wichtig ist in allen Fällen, die Kapazität der Tankstelle entsprechend dem Bedarf auszulegen, um Überkapazitäten und damit einhergehende Zusatzkosten zu vermeiden. So kann man für eine Tankstelle für circa fünf Busse mit Investitionen von 1,2 – 1,5 Mio. € rechnen, für 40 Busse kostet sie ca. 4,5 - 5 Mio. €, bei 100 Bussen ca. 8,5 - 9 Mio. €. Entsprechende Überkapazitäten wirken sich somit vor allem bei kleineren Tankstellen überproportional auf die Kosten aus.

## **Wasserstoff als Beitrag zur Reduktion der Treibhausgase**

Wasserstoff kann aus verschiedensten Quellen gewonnen werden. Die Hauptquelle ist momentan die chemische Industrie, wo ein Großteil des Wasserstoffs (ca. 90 %) durch Dampfreformierung aus konventionellem Erdgas gewonnen wird. Wird dieser Wasserstoff in einem Brennstoffzellenfahrzeug genutzt, ergeben sich bei der CO<sub>2</sub>-Bilanz kaum Einsparungen im Vergleich zur Verbrennung von Diesel. Wasserstoff kann jedoch auch über die Elektrolyse von Wasser hergestellt werden. Derartige Verfahren sind mehr und mehr im Kommen und können unter Verwendung von erneuerbarem Strom zu einer Reduktion der Treibhausgasemissionen zwischen 50 und 70 % führen, abhängig vom Verbrauch der einzelnen Busse. Wird hier jedoch der deutsche Strommix angesetzt, werden aufgrund der energetischen Verluste bei der Umwandlung des Stroms zu Wasserstoff sogar mehr CO<sub>2</sub>-Emissionen ausgestoßen als bei der Verbrennung von Diesel (ca. Faktor 2,5 mehr). Für die Reduktion der Treibhausgasemissionen ist die Wahl der Wasserstoffquelle somit entscheidend.

CO<sub>2</sub>-Emissionen der Energieträgerbereitstellung und -verbrennung bezogen auf 100 km<sup>1</sup>


\*: Wasserstoff aus der PEM-Elektrolyse mit erneuerbarem Strom

\*\* : Wasserstoff aus der Dampfreformierung von Erdgas

\*\*\*: aktueller deutscher Strommix

## Kosten

Jahrelange Optimierung des Dieselmotors und Skaleneffekte führten zu einer am Markt etablierten Technologie und entsprechend relativ geringen Anschaffungskosten. Demgegenüber stehen die aktuell noch kleinskalige Produktion von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen und die doch noch recht teuren Komponenten wie Hochvoltbatterie und Brennstoffzelle. Momentan schlagen Brennstoffzellenfahrzeuge in etwa mit dem 2,5-fachen Anschaffungspreis des Dieselmotors zu Buche. Weiterhin geht man davon aus, dass einmal pro Lebenszeit des Busses die Hauptkomponenten Batterie und Brennstoffzelle getauscht werden müssen. Zudem muss in die entsprechende Infrastruktur investiert werden, die bei Dieselmotoren bereits vorhanden ist. Wer in neue Antriebe investiert, sieht somit erst einmal hohe Anschaffungskosten auf sich zukommen.

Auch die laufenden Kosten sind aktuell noch recht hoch. Die Wartungskosten der Busse sind im Allgemeinen (bis auf den Tausch der Hauptkomponente) geringer, da der elektrische Antriebsstrang weniger komplex ist als bei Dieselmotoren. Die Kosten für den Energieträger selbst sind hingegen stark abhängig von den lokalen Gegebenheiten. Wasserstoff, der als Nebenprodukt in der Chemieindustrie anfällt, ist

**Für die Reduktion der Treibhausgasemissionen ist die Wahl der Wasserstoffquelle entscheidend.**

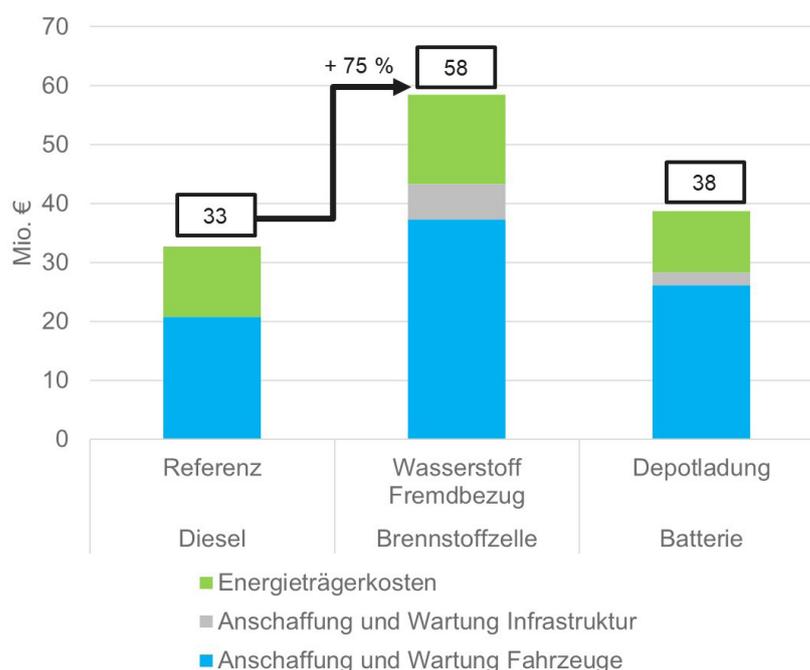
<sup>1</sup> Dargestellt sind die Treibhausgasemissionen der Bereitstellung von Wasserstoff und Strom aus verschiedenen Quellen im Vergleich zur Bereitstellung inklusive Verbrennung von Diesel (zugrundeliegende Verbräuche je 100 km: Diesel 38 l, H<sub>2</sub>: 9,5 kg, Strom: 180 kWh). Dies lässt eine erste Einschätzung zu, welche Energieträger aus welchen Quellen hinsichtlich einer CO<sub>2</sub>-Einsparung vorteilhaft sein können und welche nicht. Die Fahrzeugherstellung ist hierbei nicht berücksichtigt, da sie stark abhängig ist von der Batterie- und Brennstoffzellengröße. Im Allgemeinen ist sie bei alternativen Antrieben energieintensiver als bei konventionellen Dieselmotoren.

**Insgesamt können die alternativen Antriebe wirtschaftlich mit dem Diesel (noch) nicht mithalten.**

meist recht günstig zu bekommen. Wird der Elektrolyseur von einer günstigen Stromquelle gespeist, kann der dort erzeugte Wasserstoff ebenfalls zu wettbewerbsfähigen Preisen bezogen werden

Insgesamt können die alternativen Antriebe wirtschaftlich mit dem Diesel aber (noch) nicht mithalten. Verschiedene Ministerien sowie die EU fördern jedoch regelmäßig die Beschaffung von Null-Emissions-Fahrzeugen und den Aufbau der entsprechenden Infrastruktur. Dadurch können sich die Mehrkosten über den Lebenszyklus gegenüber der Dieselsechnologie auf ca. 75 % reduzieren, Tendenz fallend. Die untenstehende Grafik zeigt den Kapitalwert einer Busflotte von 50 Bussen über eine mittlere Haltedauer von 13 Jahren. Sie veranschaulicht, dass die Hauptkostentreiber aktuell (noch) die hohen Anschaffungskosten der Busse sind.

Kapitalwertvergleich verschiedener Bustechnologien<sup>2</sup>



<sup>2</sup> Die Grafik zeigt die Kapitalwerte verschiedener Bustechnologien inklusive Infrastruktur in einem Betrachtungszeitraum von 13 Jahren für eine Flotte von 50 Bussen. Angenommen wurde eine Belieferung des Wasserstoffs für die Brennstoffzellenfahrzeuge (theoretisch wäre hier auch eine eigene Herstellung des Wasserstoffs durch Elektrolyse möglich, wird hier jedoch nicht betrachtet). Für batterieelektrische Busse (BEV) gehen wir von einer Depotladung über Nacht mit 50 kW Ladeleistung aus. Die hohen Anschaffungskosten der alternativen Antriebe gegenüber der Referenztechnologie zeigen sich hier. Die Energieträgerkosten wiederum liegen auf etwa ähnlichem Niveau.

## Last but not least: Die Menschen

Lokal emissionsfreie Fahrzeuge leisten einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der Luftqualität sowohl in den Städten als auch an vielbefahrenen Straßen im ländlichen Bereich. Mit dem entsprechenden Wasserstoffbezugspfad können wasserstoffbetriebene Fahrzeuge auch einen entscheidenden Beitrag zur Reduktion der Treibhausgase leisten. Beides sind Themen, die seitens der Bürger immer mehr gefordert werden.

Die viel gefürchtete Reichweitenangst bei batterieelektrischen Fahrzeugen ist bei Wasserstofffahrzeugen fehl am Platz. Der elektrische Antriebsstrang erzeugt zudem kaum Vibrationen und Geräusche, wovon Fahrer und Fahrgäste gleichermaßen profitieren.

## Der Weg in die Zukunft: Zero Emission

Der gesellschaftliche Wunsch, die Luft in den Städten zu verbessern sowie den Klimawandel zu bekämpfen, steht außer Frage. Der Einstieg in alternative Antriebsformen im ÖPNV kann dazu einen wichtigen Beitrag leisten. Doch welche ist die für mich passende Technologie? Batterieelektrisch? Wasserstoff? Oder vielleicht die Kombination aus beidem? Diese Frage stellen sich momentan viele Nahverkehrsunternehmen und sie kann (leider) nicht pauschal beantwortet werden. Umlauflänge, Umlauftyp (SORT 1-3), Platzverhältnisse, Flexibilität im Betriebsablauf, vorhandene Finanzmittel und Anforderungen an die Versorgungssicherheit sind Randbedingungen, die berücksichtigt werden müssen. Die individuellen, lokalen Anforderungen bestimmen maßgeblich, welche Technologie für den Busbetrieb die passende ist. Wasserstofffahrzeuge eignen sich beispielsweise speziell für die Busbetriebe, die die volle Flexibilität in Ihrer Umlaufplanung behalten wollen und die über eher längere Umläufe verfügen.

## Über thinkstep

Als Projektpartner in zahlreichen Projekten auf Bundes- und EU-Ebene (bspw. Alternative Antriebe Bus, CHIC, JIVE, NewBusFuel) begleitet thinkstep die Entwicklung alternativer Antriebe – insbesondere Wasserstoff – im ÖPNV seit über 20 Jahren. Unsere erfahrenen Berater unterstützen Nahverkehrsunternehmen bei der ganzheitlichen Bewertung verschiedener Antriebskonzepte. Dazu gehören neben der betrieblich-technischen Bewertung genauso die Analyse der ökologischen und ökonomischen Auswirkungen, die eine Umstellung auf alternative Antriebe mit sich bringt.

---

### **Future-Proof Your Business.**

thinkstep AG Hauptstr. 111 – 113  
70771 Leinfelden-Echterdingen,  
Deutschland

Email [info@thinkstep.com](mailto:info@thinkstep.com) Phone  
+49 711 341817-0  
Fax +49 711 341817-25  
[www.thinkstep.com](http://www.thinkstep.com)