

Brennstoffzellen im öffentlichen Personennahverkehr

Elektrobusse verbessern die Lebensqualität in den Städten





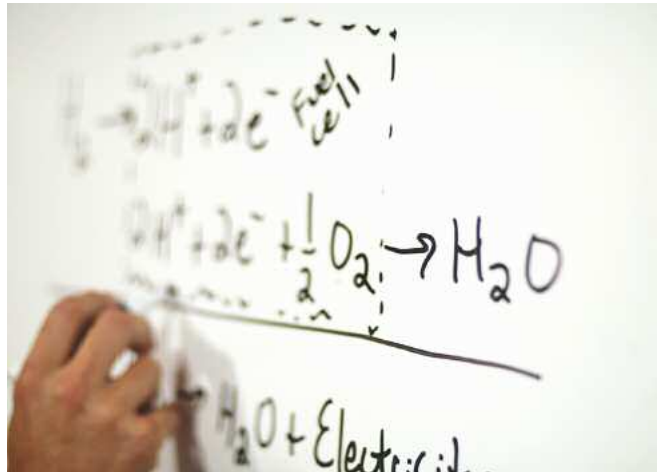
Tarek Al Wazir
Hessischer Minister für Wirtschaft,
Energie, Verkehr und Landesentwicklung

Sehr geehrte Leserinnen und Leser,

Mobilität ist ein Grundbedürfnis moderner Gesellschaften, und ohne den öffentlichen Personennahverkehr ist sie nicht zu sichern. Wenn wir Lärm und Schadstoffausstoß begrenzen, die Lebensqualität unserer Städte verbessern, das Klima schonen und den Verkehr insgesamt flüssig halten wollen, brauchen wir ein attraktives und leistungsfähiges Netz von Bus- und Bahnlinien. Schon heute fahren jede Hessin und jeder Hesse statistisch gesehen jedes Jahr fast 1000 Kilometer mit öffentlichen Verkehrsmitteln, und dieser Wert wird voraussichtlich noch steigen. Natürlich muss sich auch der ÖPNV immer fragen, wie er seine Transportleistung möglichst umweltfreundlich, energieeffizient und CO₂-arm erbringen kann. Doch während der öffentliche Schienenverkehr schon zu großen Teilen elektrifiziert ist, fahren Busse noch in der Regel mit Dieselmotoren.

Analog zum bereits elektrifizierten, schienengebundenen ÖPNV soll zukünftig auch im Buslinienverkehr der elektrische Antrieb Einzug halten. Elektrische Antriebe sind effizient, leise und stoßen keine Schadstoffe aus. Darüber hinaus helfen sie dabei, erneuerbare Energien breit einzusetzen und den Energie- und den Mobilitätssektor künftig besser zu verbinden. Welche Rolle der Brennstoffzellenantrieb bei der Elektrifizierung spielen kann, zeigt diese Broschüre.

Ich wünsche Ihnen eine anregende Lektüre.



H2BZ-Initiative Hessen

Wasserstoff und Brennstoffzellen werden in der Zukunft eine wichtige Rolle bei der nachhaltigen Energieversorgung und leistungsfähigen Elektromobilität einnehmen. Hessen verfügt über eine ausgezeichnete Struktur von Unternehmen und Hochschulen, die hervorragende Kompetenzen auf dem Gebiet der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie besitzen.

Um ihre Interessen zu bündeln und um eine leichtere Realisierung der Ziele durch ein aktives Netzwerk zu erleichtern, haben sich die hessischen Akteure zu einer Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Initiative (kurz: H2BZ-Initiative Hessen e.V.) zusammengeschlossen. Darin wirkt auch die HA Hessen Agentur GmbH im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung aktiv mit.

www.h2bz-hessen.de

INHALT

GRUSSWORT	1
1 ZUKUNFTSWEISENDE ENERGIETECHNOLOGIEN: WASSERSTOFF UND BRENNSTOFFZELLEN	5
2 MOBILITÄT DER ZUKUNFT: EFFIZIENT, KLIMAFREUNDLICH UND LEISE	9
2.1 Elektromobilität und öffentlicher Personennahverkehr (ÖPNV)	9
3 ELEKTROBUSSE: ELEKTRIFIZIERUNG DES ÖPNV GEHT WEITER	14
3.1 Kennzeichen elektrischer Busantriebe	16
3.2 Auslegung von brennstoffzellenelektrischen Antrieben	19
3.3 Betankungs-Infrastruktur	22
4 KOMMERZIALISIERUNG VON BUSSEN MIT BRENNSTOFFZELLEN	24
4.1 Wirtschaftlichkeit und Betrachtung der Total Cost of Ownership (TCO)	27
4.2 Eine Frage der Zeit: Elektrische bzw. brennstoffzellenelektrische Busse erobern den Linienverkehr	30
4.3 Fördermittel und Beschaffungsinitiativen für Busse mit Brennstoffzellentechnologie	33
5 WEITERFÜHRENDE INFORMATIONEN	34
5.1 Adressen und Ansprechpartner in Hessen	34
5.2 Organisationen und Einrichtungen	34
5.3 Themenbezogene Publikationen	35
6 ELEKTROMOBILITÄT HAT VORRANG IN HESSEN	36
7 ANHANG	38
7.1 Häufig gestellte Fragen	38
7.2 Datenblätter und Umrechnungstabellen	40
IMPRESSUM	42



Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien sind wichtige Säulen der Energiewende sowohl im Strom- als auch im Mobilitätssektor. Überall, wo Energie effizient, klimafreundlich und aus erneuerbaren Quellen zum Einsatz kommt, bieten Wasserstoff und Brennstoffzellen innovative und nachhaltige Lösungen. Auch für den öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV).

Die vorliegende Broschüre vermittelt verständliche und praktische Informationen über Elektrobusse mit Brennstoffzellen-Antriebssystem. Es wird aufgezeigt, welchen Stellenwert Wasserstoff und Brennstoffzellen (H2BZ*) für einen nachhaltigen öffentlichen Personennahverkehr der Zukunft und im Rahmen der Elektromobilität haben können. Darüber hinaus liefert die Broschüre Informationen über den technischen Entwicklungsstand, über das Thema Infrastruktur sowie über die Verfügbarkeit der Busse auf dem Markt. Nicht zuletzt werden Fragen der Wirtschaftlichkeit erläutert. Ein Überblick über Kontakte zu relevanten Einrichtungen und Ansprechpartnern in Hessen und bundesweit sowie die Antworten auf die am häufigsten gestellten Fragen runden die Broschüre ab.

* Aus Gründen der Vereinfachung steht „H2BZ“ für „Wasserstoff und Brennstoffzelle“. Im Gegensatz dazu wird jedoch H₂ geschrieben, wenn es für Wasserstoff alleine steht.

1 ZUKUNFTSWEISENDE ENERGIETECHNOLOGIEN: WASSERSTOFF UND BRENNSTOFFZELLEN

Der Wunsch nach höherer Energieeffizienz und einem besseren Klimaschutz hat mittlerweile alle wirtschaftlichen, politischen und gesellschaftlichen Ebenen erreicht. Mit der von der Bundesregierung 2011 initiierten Energiewende wurde aus dem Wunsch eine Notwendigkeit, um die mit der Energiewende bis 2050 verabschiedeten Ziele tatsächlich erreichen zu können. Dazu sind nicht nur Technologien zur Effizienzsteigerung, sondern auch der weitreichende

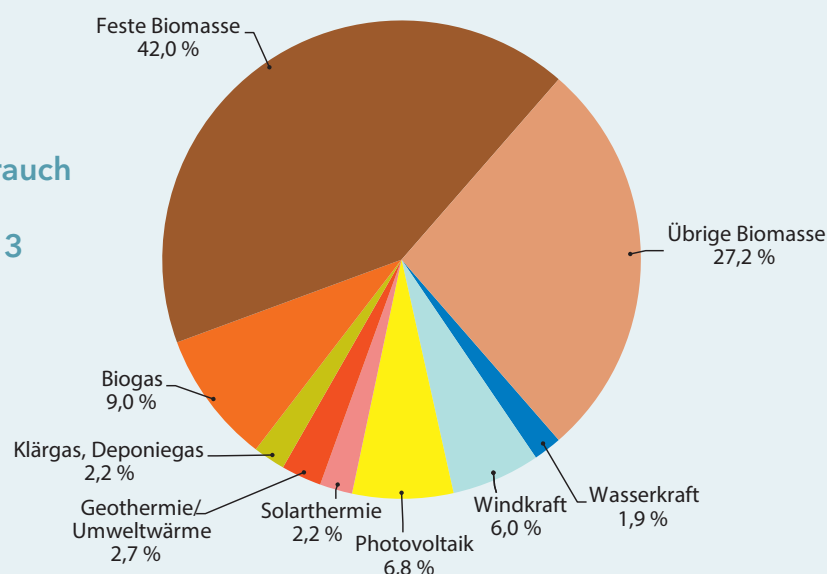
Einsatz erneuerbarer Energien erforderlich, und das bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung der Stabilität der Stromnetze und Versorgungssicherheit der Bevölkerung. Brennstoffzellen als hocheffiziente Energiewandler für Strom und Wärme sowie Wasserstoff als sauberer Energieträger und Energiespeicher für den Einsatz in Massenmärkten bieten ideale Voraussetzungen, den anstehenden Herausforderungen in der Energieversorgung nachhaltig zu begegnen.

Hauptziele der Energiewende bis 2050 in Deutschland und Hessen

Mit der 2011 von der Bundesregierung verabschiedeten Energiewende wurde neben dem Ausstieg aus der Atomenergie der Aufbau einer zukunftsweisenden und intelligenten Energieversorgung in Deutschland in die Wege geleitet, die vornehmlich auf regenerative Energien setzt. Die Energieversorgung der Zukunft zeichnet sich durch einen geringeren Energieverbrauch und niedrigere Schadstoff-Emissionen sowie den weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien – insbesondere Wind und Sonne – aus. Um die Energieeffizienz zu verbessern, hat sich die Bundesregierung bis 2050 zum Ziel gesetzt, den Primärenergieverbrauch um 50 Prozent gegenüber 2008 zu reduzieren. Beabsichtigt ist, den Ausstoß der Treibhausgase bereits bis 2020 um 40 Prozent und um 80 bis 95 Prozent bis 2050 zu senken. Gleichzeitig soll der Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttoendenergieverbrauch von rund 10 Prozent (2010) auf rund 60 Prozent im Jahr 2050 steigen. Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien spielen in diesem Zusammenhang eine wesentliche Rolle.

Hessen unterstützt durch seine Landespolitik aktiv das Vorhaben der Bundesregierung. In Hessen lag der Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung 2013 bei 8,6 Prozent. Ziel ist es, bis 2050 den Endenergieverbrauch möglichst zu 100 Prozent aus erneuerbaren Energiequellen zu decken. Gleichzeitig werden die Effizienz insbesondere im Bereich der Gebäudeenergie und im Verkehr erhöht und Energieeinsparungen realisiert. Darüber hinaus fördert die Hessische Landesregierung den Ausbau der Energieinfrastruktur sowie die gesellschaftliche Akzeptanz für den Umsetzungsprozess, der mit der Energiewende einhergeht.

Primärenergieverbrauch an erneuerbaren Energieträgern 2013 in Hessen



Quelle: Hessisches Statistisches Landesamt, www.statistik-hessen.de



visdia | Fotolia.com

Brennstoffzellen als Energiewandler

Insbesondere als Antrieb für Fahrzeuge sowie in der Stromerzeugung und Klimatisierung von Gebäuden bieten Brennstoffzellen ein großes Verbesserungspotenzial hinsichtlich Energieverbrauch und Emissionen (Luftschadstoffe und Lärm) gegenüber herkömmlichen Technologien. Als Energiewandler eröffnen sie einen vielversprechenden Weg, den Wirkungsgrad von Energieversorgungssystemen zu erhöhen und damit den Energiebedarf zu reduzieren. Im Gegensatz zu konventionellen Energiewandlern wie beispielsweise Verbrennungsmotoren oder Turbinen, die die chemische Energie des Kraftstoffs zuerst in thermische und dann in mechanische Energie umwandeln, erzeugen Brennstoffzellen aus der chemischen Energie des Kraftstoffs (Wasserstoff) direkt Strom. In der mobilen Anwendung ist der

Wirkungsgrad eines Brennstoffzellen-Elektroantriebs mit knapp 50 Prozent heute schon doppelt so hoch wie der eines modernen Dieselmotors. Im Bereich der stationären Anwendungen liegt der Wirkungsgrad der Brennstoffzellensysteme bei rund 90 Prozent, wenn sowohl Strom als auch Wärme durch Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) genutzt werden.

In der Brennstoffzelle wird ein Kraftstoff (meist Wasserstoff) und Sauerstoff (aus der Luft) mithilfe eines Katalysators und einer Membran zusammengeführt. Dabei entstehen Strom, Wasser und Wärme. Brennstoffzellen, die mit reinem Wasserstoff betrieben werden, verursachen lokal keine Emissionen. Selbst beim Einsatz von Erdgas oder Methanol fallen wesentlich niedrigere CO₂-Emissionen pro Einheit Nutzenergie an als bei der Verbrennung von fossilen Brennstoffen.

BRENNSTOFFZELLENSYSTEME: ANWENDUNGSGEBIETE, PRODUKTE UND TYPEN

ANWENDUNG	STATIONÄR		MOBIL	PORTABEL		SPEZIELLE ANWENDUNGEN	
Produkt	Strom- und Heizgeräte für Ein- und Mehrfamilienhäuser	Heizkraftwerke für Industrieanlagen, Kliniken und andere Großimmobilien	Antrieb für PKW, Busse und leichte NFZ	Batterieladegeräte, Stromversorgung für Konsumelektronik, im Freizeitbereich	APU (Auxiliary Power Unit)-Bordstrom	Notstromaggregate und USV	Antrieb für Zweiräder, Flurförderzeuge, U-Boote, Sonderfahrzeuge
Funktion der BZ	Strom und Wärme	Strom/ Wärme/ Kühlung	Strom	Strom	Strom	Strom	Strom
BZ-Typ	LT-/HT-PEMFC, PACFC, MCFC, SOFC	LT-/HT-PEMFC, PACFC, MCFC	LT-PEMFC	LT-/HT-PEMFC, DMFC	LT-/HT-PEMFC, DMFC	LT-/HT-PEMFC, DMFC	LT-/HT-PEMFC, DMFC, AFC
Kraft-Brennstoff	Erd-, Biogas, H ₂	Erd-, Biogas, H ₂	H ₂	H ₂ Methanol	H ₂ Methanol	H ₂ Methanol	H ₂ Methanol



vege | Fotolia.com



© Agentur für Erneuerbare Energien



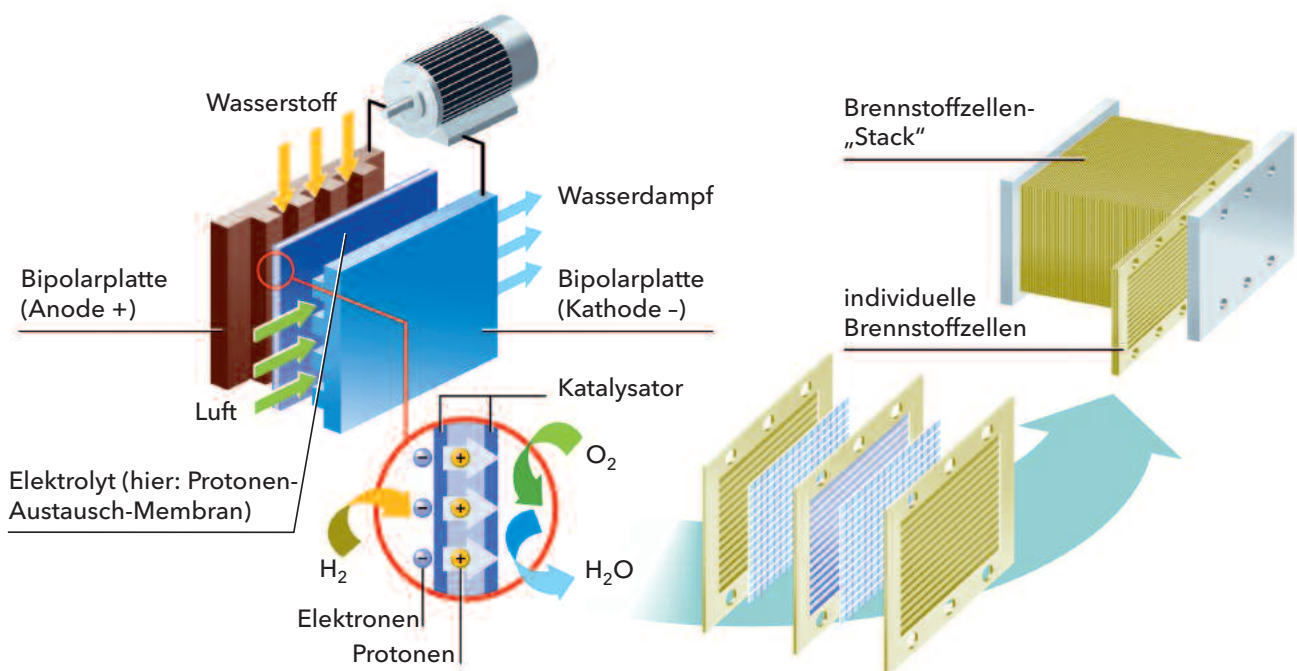
© Agentur für Erneuerbare Energien

Man unterscheidet heute sieben Brennstoffzellen-Typen:

1. Alkalische Brennstoffzellen
(engl. Alkaline Fuel Cell, abgekürzt: AFC)
2. Niedertemperatur-Protonenaustausch-Membran-Brennstoffzellen (engl. Low Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cell, LT-PEMFC)
3. Hochtemperatur-Protonenaustausch-Membran-Brennstoffzellen (engl. High Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cell, HT-PEMFC)
4. Direkt-Methanol-Brennstoffzellen
(engl. Direct Methanol Fuel Cell, DMFC)
5. Phosphorsaure Brennstoffzellen
(engl. Phosphore Acid Fuel Cell, PAFC),
6. Schmelzkarbonat-Brennstoffzellen
(engl. Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC)
7. Oxidkeramische Brennstoffzellen
(engl. Solid Oxide Fuel Cell, (SOFC))

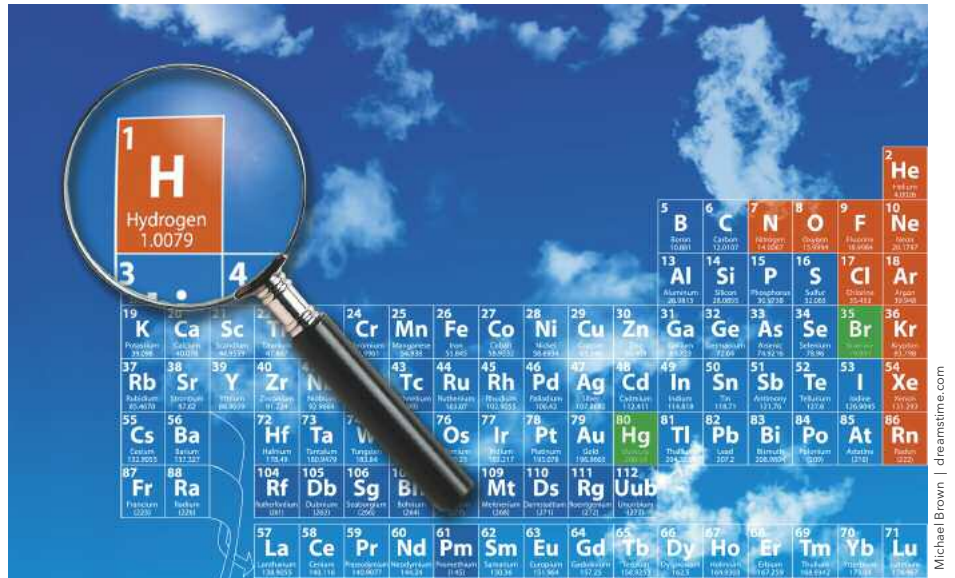
Der Einsatz des jeweiligen Brennstoffzellen-Typs richtet sich nach dem Anwendungsgebiet. Wird vorwiegend Strom benötigt, der sehr dynamisch bereitgestellt muss (beispielsweise als Fahrzeugantrieb), eignen sich aufgrund ihrer Eigenschaften eher PEM-Brennstoffzellen. Möchte man sowohl Strom als auch Wärme im Sinne einer Kraft-Wärme-Kopplung auf einem sehr konstanten Leistungsniveau nutzen, was insbesondere in der Energieversorgung von Gebäuden von großem Interesse ist, sind Hochtemperatur-Brennstoffzellen wie SOFC, MCFC und PAFC meist die gewählte Technik.

Funktionsprinzip einer PEM-Brennstoffzelle



Wasserstoff H_2

Wasserstoff trägt im Periodensystem der chemischen Elemente die Nummer 1 und wird mit H (lat. Hydrogenium, engl. Hydrogen) abgekürzt. Bei Umgebungsbedingungen ist Wasserstoff ein sehr leichtes, ungiftiges Gas mit einem Kondensationspunkt von $-259,14^\circ\text{C}$. Seine Atome haben den kleinsten Durchmesser, er besitzt die geringste Dichte und ist das bei Weitem häufigste Element des Universums. Er kommt molekular als H_2 vor.



Wasserstoff als Energieträger

Wasserstoff (H_2) ist – wie Strom auch – ein Energieträger und keine Energiequelle. Auf der Erde kommt er nie in Reinform, sondern grundsätzlich in chemischen Verbindungen wie Wasser, Kohlenwasserstoffen und anderen organischen Verbindungen vor. Aus diesen chemischen Verbindungen kann er durch Energiezufuhr herausgelöst werden und steht dann als Kraft-, Treib- und Brennstoff zur Verfügung.

Im Gegensatz zu konventionellen Kraft- und Treibstoffen weist Wasserstoff im Hinblick auf die Primärenergiequellen, mit denen er erzeugt wird, die höchste Flexibilität auf. Er kann, wie Strom auch, aus fossilen oder erneuerbaren Energien hergestellt werden. Fossile Energien sind an geografische Vorkommen gebunden, während die Erzeugung von Wasserstoff aus Biomasse oder erneuerbaren Energien theoretisch überall dort erfolgen kann, wo der Wasserstoff auch benötigt wird. Dies führt zu einer größeren wirtschaftlichen Unabhängigkeit von Produzenten und Verbrauchern. Seit Jahrzehnten kommt Wasserstoff in verschiedenen Industrien bei einer Vielzahl von Prozessen zum Einsatz. Auch zur Energieversorgung war Wasserstoff schon einmal weit verbreitet. Als Hauptbestandteil des sogenannten Stadtgases war er bis Mitte des 20. Jahrhunderts

zum Heizen, Kochen und für die Straßenbeleuchtung in Städten gebräuchlich, bevor er durch Erdgas ersetzt wurde.

Anders als Strom hat Wasserstoff aufgrund seiner Eigenschaften das Potenzial, nicht nur Energieträger, sondern auch Zwischenspeicher für überschüssigen Strom aus erneuerbaren Energien zu werden. Wind und Sonne erzeugen Strom unabhängig vom Strombedarf und stellen damit die bisherige Energieversorgung vor große Herausforderungen, da überschüssiger Strom nicht im Netz gespeichert werden kann. Dieser überschüssige Strom lässt sich allerdings für die Erzeugung von Wasserstoff mittels Elektrolyse nutzen, der sich dann in Tanks oder unterirdischen Kavernen langfristig speichern lässt. Bei Bedarf wird Wasserstoff wieder verstromt und zurück ins Netz gespeist. Außerdem kann der so erzeugte Wasserstoff unmittelbar in Fahrzeugen, Anlagen und Geräten mit Brennstoffzellensystem als Treibstoff eingesetzt werden.

Auch die Einspeisung ins bestehende Erdgasnetz ist möglich, entweder direkt oder in Form von synthetischem Methan (Stichwort Power-to-Gas). Auf diese Weise ist Wasserstoff eng verbunden mit der Nutzung und dem weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien.

2 MOBILITÄT DER ZUKUNFT: EFFIZIENT, KLIMAFREUNDLICH UND LEISE

Mobilität, beziehungsweise der Umstand, fast grenzenlos mobil sein zu können, wird heute in weiten Teilen der Welt als etwas Selbstverständliches begriffen. Mobilität ist vielfach Basis des Wohlstandes und unabdingbar für wirtschaftliche, politische und gesellschaftliche Entwicklungen geworden. Mobilität wird vorwiegend mit der Möglichkeit in Verbindung gebracht, Personen und Güter von einem Ort zum anderen zu transportieren. In diesem Zusammenhang ist Mobilität eng mit dem Begriff Verkehr verknüpft.

Die positiven Aspekte der Mobilität und des Verkehrs geraten zunehmend in Verruf, denn sie werden insbesondere in Ballungsgebieten inzwischen mit den Begriffen Stau, Lärm, Abgase, Umweltverschmutzung sowie endlichen Energieressourcen assoziiert. Eine zukunftsfähige Mobilität ist deshalb nur unter Berücksichtigung dieser Belange möglich. Ebenso wie der Energiesektor steht auch der Verkehrssektor im Zeichen der Energiewende. Es bedarf Lösungen, die die Mobilitätsbedürfnisse aller Bevölkerungsgruppen erfüllen und dabei Ressourcenverbrauch, schädliche Emissionen*, aber auch Unfälle und deren Folgen minimieren.

Verkehr

Allgemein versteht man unter dem Begriff Verkehr alle Maßnahmen, um Personen, Güter (und Nachrichten) zu befördern. Dazu gehören die unterschiedlichen Verkehrswege Straße, Schiene, Wasser und Luft mit den jeweils dazugehörigen Transportmitteln sowie seine Organisation (Logistik). Die Beförderung unterteilt sich in Individual-, Flotten- und öffentliche Verkehre.

Gleichzeitig gilt es sicherzustellen, dass Mobilität auch morgen noch für jeden erschwinglich bleibt. Die Elektromobilität bietet einen vielversprechenden Lösungsansatz, den Verkehrssektor nicht nur in Deutschland nachhaltig, zukunftsfähig und anwenderfreundlich zu gestalten. Dabei eröffnet sie die Möglichkeit, Verkehr und Energieversorgung in ein ganzheitliches Energiesystem zu integrieren.

* Mit Emissionen im Verkehr werden in der Broschüre insbesondere die schädlichen Ab- und Klimagase, wie CO₂, Stickoxide (NO_x), Rußpartikel, und Lärm bezeichnet. Daher auch der Begriff „Null Emissionen“, obwohl Fahrzeuge im Verkehr weitere Stoffe wie Wasser(dampf) emittieren.

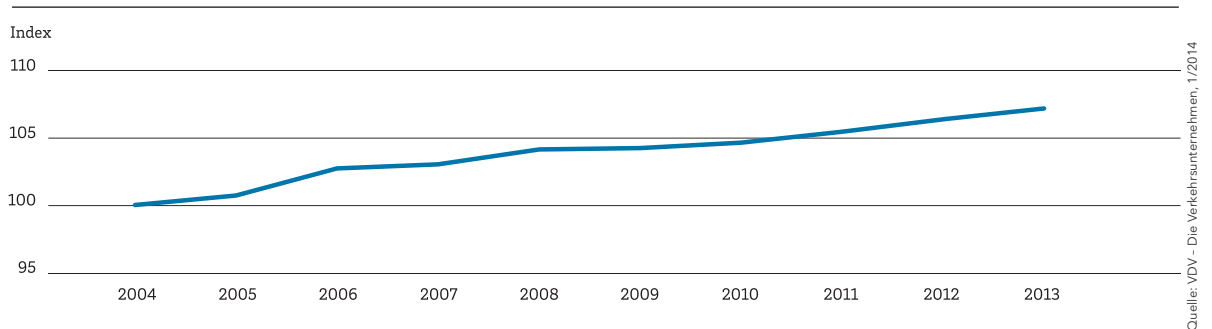
2.1 ELEKTROMOBILITÄT UND ÖFFENTLICHER PERSONENNAHVERKEHR (ÖPNV)

Ballungsräume und Städte sind durch ihre verdichteten Strukturen besonders vom zunehmenden Verkehr und den damit verbundenen negativen Auswirkungen betroffen. Entsprechend groß ist das Interesse, dort den Anteil des öffentlichen Personennahverkehrs weiter auszubauen (derzeit liegt der Anteil bei 8 Prozent**) und elektromobile Konzepte umzusetzen, die den negativen Aspekten der Mobilität entgegenwirken.

Dies gilt insbesondere für den Busverkehr, da der öffentliche schienengebundene Personennahverkehr in großen Städten (> 100.000 Einwohner) durch gut ausgebaute U-, S-Bahn- und Tramnetze bereits größtenteils elektrifiziert ist und lokal keinerlei Emissionen verursacht. Der Busverkehr dagegen beruht – wie die meisten anderen Straßenfahrzeuge – größtenteils noch immer auf verbrennungsmotorischen Antrieben und verursacht dementsprechend Treibhausgasemissionen, Rußpartikel, Feinstaub und Lärm.

** Vgl. www.uitp.org

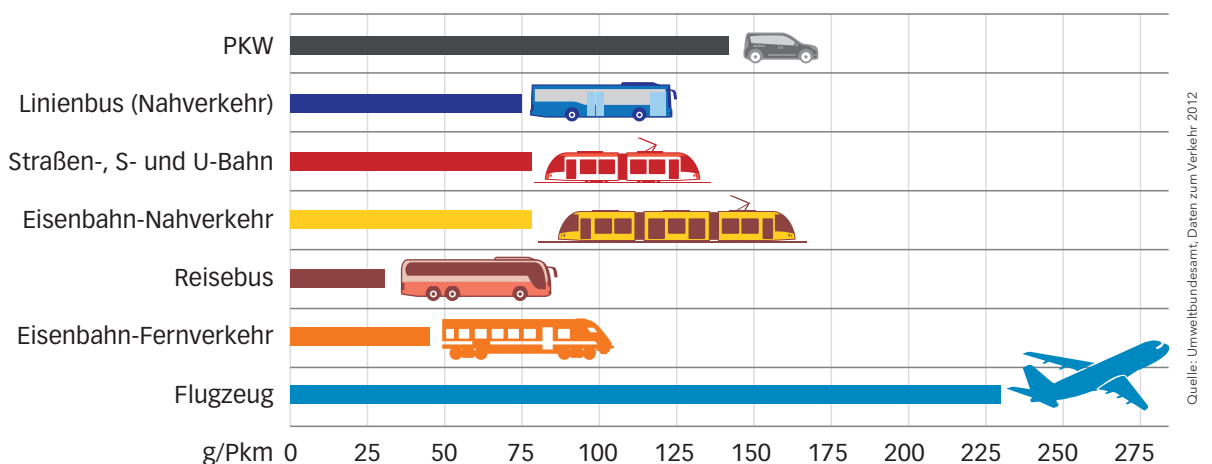
Fahrgäste im ÖPNV



Nach Analysen des deutschen Verkehrsunternehmensverbands (VDV) spart die Nutzung von Bussen und Bahnen heute schon bundesweit rund 15 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr ein, so viel, wie ein ganzes Kohlekraftwerk ausstößt*. Wenn man den spezifischen Energieverbrauch pro Passagier und Kilometer rechnet, ergibt sich für den ÖPNV mit 0,33 kWh ein Vorteil von 40 Prozent gegenüber dem PKW. Neben den Umweltgesichtspunkten spielen aber auch wirtschaftliche Aspekte eine Rolle beim Ausbau des ÖPNV. Laut Untersuchungen der Europäischen Transportvereinigung UITP kostet der ÖPNV die

Gesellschaft insgesamt weniger Geld als der Individualverkehr. Ein ÖPNV-Fahrzeug hat eine wesentlich höhere Passagierkapazität als ein PKW und verbraucht damit weniger Fläche in den Städten. Dies gilt einmal mehr im Hinblick auf die Parkflächen. Öffentliche Verkehrsmittel sind durchschnittlich 20 Stunden pro Tag und damit fast rund um die Uhr im Einsatz, während ein privater PKW im Schnitt 23 Stunden täglich ungenutzt herumsteht, auf Flächen, die dadurch nicht anderweitig genutzt werden können. Auch im Bereich der Unfallstatistik schneidet der ÖPNV besser als der PKW-gebundene Verkehr ab.

Treibhausgase als CO₂-Äquivalente



* Vgl. Schadstofffreisetzungs- und -verbringungsregister (PRTR) unter www.thru.de

Bedarf/Kapazität für die Beförderung von 10.000 Personen über 1 km

	Anzahl Passagiere	Anzahl Fahrzeuge	Fläche (m ²)	Kraftstoff- verbrauch (l)
	5	2.000	24.000	200
	25	400	8.800	120
	100	100	3.400	50
	175	57	2.850	35
	270/300	37	2.370	26

Quelle: UITP, 2010

Die Transportkapazität pro Fahrzeug hängt von der Busgröße ab, die von Mini- und Midi-Bussen (9–11 Meter Länge) über Standardbusse bis hin zu Gelenk- und Doppelgelenk-Bussen (bis 25,5 Meter Länge) reicht. Auch der Innenausbau und die Platzvorgaben für sitzende und stehende Passagiere haben Einfluss auf die Gesamtkapazität.

Das Ziel für die Mobilität der Zukunft ist ein nachhaltiger Stadt-, Regional- (insbesondere Pendlerverkehre ins städtische Umland) und Überregionalverkehr, der alle Verkehrsmittel einschließt. Die Elektrifizierung des straßengebundenen öffentlichen Personennah-, des Wirtschafts- und Individualverkehrs als Ergänzung zum bereits elektrifizierten (leitungsgesunden) öffentlichen Schienennah- und -fernverkehr und dem Schienengüterverkehr sowie die optimale (nahtlose) Vernetzung aller Verkehrsträger bilden das Fundament eines zukünftig auf Elektromobilität ausgelegten Verkehrssystems.

Die Ergebnisse des zwischen 2009 und 2011 durchgeführten Förderprogramms Modellregion Elektromobilität der Bundesregierung haben gezeigt, dass sich Bus- und Wirtschaftsverkehre als das erste potenziell rentable Einsatzfelder für Elektromobilität anbieten. Für den privaten Verkehr wird sich Elektromobilität aus Kostengründen erst mittelfristig durchsetzen können. Durch die Einbindung der Bürger in den Gestaltungsprozess wird frühzeitig die notwendige Akzeptanz geschaffen, die für den Ausbau und den Erfolg der erneuerbaren Energien und der Elektromobilität unabdingbar ist.



Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität NEP

Deutschland hat 2009 den Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität verabschiedet und damit die Weichen für eine zukunftsfähige Mobilität gestellt. Im NEP wurde das Ziel erklärt, bis 2020 eine Million Elektrofahrzeuge auf Deutschlands Straßen zu bringen und das Land zum Leitmarkt für Elektromobilität zu entwickeln. Neben dem bereits erfolgreich gestarteten Nationalen Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) werden mit dem NEP Entwicklungen im Bereich der Energiespeichertechnologien, der batterieelektrischen Antriebe sowie der Aufbau einer Stromladeinfrastruktur verfolgt. Batterie- und die Brennstoffzellentechnologie sind aus Sicht der Bundesregierung sich ergänzende Technologien, die beide in gleichem Maße weiterentwickelt werden sollen. Die einzelnen Bundesländer sind ebenfalls dabei oder haben bereits das nationale Programm durch eigene Förderprojekte und -initiativen ergänzt, die die Einführung der H2BZ-Technologie in den jeweiligen Bundesländern verstärken.

Weitere Informationen unter

<http://www.bundesregierung.de/Content/DE/Infodienst/2012/10/2012-10-12-elektromobilitaet/2012-10-12-elektromobilitaet.html>



Förderprogramm Modellregionen Elektromobilität

Das Förderprogramm mit einem Volumen von 130 Millionen Euro wurde 2009 im Rahmen des Konjunkturpakets II vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) verabschiedet, von der Nationalen Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW) koordiniert und hatte eine Laufzeit bis Ende 2011. Das Programm war und ist Teil des Nationalen Entwicklungsplans Elektromobilität und ein wichtiger Treiber auf dem Weg, Deutschland bis 2020 zum Leitmarkt für Elektromobilität zu entwickeln und bis dahin eine Million Elektrofahrzeuge auf die Straßen zu bringen. Die anwendungsorientierten Projekte in den acht Modellregionen Berlin/Potsdam, Bremen/Oldenburg, Hamburg, München, Rhein-Main, Rhein-Ruhr, Sachsen und Stuttgart trugen dazu bei, die Elektromobilität in Deutschland aufzubauen und seine Machbarkeit zu demonstrieren. Die Schwerpunkte des Programms lagen in der Forschung und Entwicklung sowie in der Marktvorbereitung und Markteinführung von batterieelektrischen Fahrzeugen.

Weitere Informationen unter www.now-gmbh.de



Petair | fotolia.com

Praxisbeispiel Modellregion Rhein-Main

Koordiniert von den Stadtwerken Offenbach hat die Modellregion Rhein-Main die Machbarkeit der Elektromobilität im Rahmen von 14 Einzelprojekten demonstriert. Es wurden über 400 Fahrzeuge in unterschiedlichen Anwendungsgebieten eingesetzt. Das Spektrum reichte dabei von Bussen im öffentlichen Personennahverkehr (Hybrid- und Elektroantrieb) über Nutz- und Lieferfahrzeuge im innerstädtischen Einsatz, Pedelecs, ein Hybridschienenfahrzeug und Roller bis hin zu Elektrofahrzeugen für Firmenflotten und Carsharing-Systeme. Außerdem lag ein Schwerpunkt auf dem Aufbau einer Infrastruktur (Normal-, Drehstrom-, DC-Schnellladung, Induktion) und der Sicherung der Anschlussmobilität zum öffentlichen Nah- und Fernverkehr. Die im Förderprojekt gesammelten Erfahrungen und Ergebnisse dienen als Grundlage für neue Aktivitäten und nächste Schritte, um das Thema Elektromobilität in Hessen weiter voranzubringen.

Weitere Informationen unter

<https://www.offenbach.de/stadtwerke/microsite/le/index.php>



Praxisbeispiel e-Beschaffungsinitiative Hessen: Elektromobilität erfahrbar und sichtbar machen

Für Maßnahmen und Projekte im Bereich der Elektromobilität stellt die hessische Landesregierung im Zeitraum 2012-2016 Fördermittel in Höhe von insgesamt 6,6 Mio. Euro für verschiedene Elektromobilitätsprojekte zur Verfügung. Im Rahmen der e-Beschaffungsinitiative wurden seit Anfang 2013 85 Elektrofahrzeuge an verschiedene Dienststellen der Hessischen Landesverwaltung übergeben. Die Mehrkosten, die die Anschaffung (Leasing oder Kauf) eines E-Fahrzeugs verursacht, werden durch dieses Programm für die Landesverwaltung anteilig aufgefangen.

Weitere Informationen unter www.strom-bewegt.hessen.de



Praxisbeispiel e-Flotte - elektromobil unterwegs

Im Frühling 2015 startete Hessen als bundesweit erstes dieser Art ein Elektromobilitätsprojekt für kleine und mittlere Unternehmen. Für jeweils bis zu zwei Wochen konnten Unternehmen Personenwagen und Kleintransporter mit Elektroantrieb testweise im Arbeitsalltag einsetzen und sich ein eigenes Bild von den Vorteilen machen. An dem Projekt beteiligten sich mehrere Autohersteller mit aktuellen Elektromodellen. Insgesamt kommen bis zu 30 Fahrzeuge im Rahmen des Projekts zum Einsatz.

Weitere Informationen unter www.eflotte-hessen.de



Busse bilden das Rückgrat des öffentlichen Personennahverkehrs. Anders als der Schienenverkehr binden Buslinien auch entlegene, meist ländliche Gegenden an und ermöglichen Menschen ohne eigenes Fortbewegungsmittel (insbesondere Ältere und Schüler) den Zugang zu städtischen Infrastrukturen (Schulen, Ärzte, Banken, Supermärkte, Behörden etc.). Allerdings nutzen Busse heute ebenso wie Autos fossile Energieträger und stoßen Treibhausgase wie CO₂ und Ruß aus, mit entsprechenden Folgen für die Umwelt.

Bedingt durch die immer schärfer werdenden Emissionsregelungen und durch die fortschreitenden Entwicklungen im Bereich Elektromobilität, werden seit geraumer Zeit neue Elektrifizierungskonzepte bei Stadtbussen untersucht und erprobt.

Für neue Busse (und Nutzfahrzeuge) über 3,5 Tonnen gelten seit Anfang 2014 die Euro-6-Normen, die die bisher schärfsten Grenzwerte für CO₂, Stickoxide und Rußpartikel vorschreiben.

Nach derzeitigem Stand der Technik ist beispielsweise bei Dieselfahrzeugen die Einhaltung der Grenzwerte nur noch mit einem geschlossenen Dieselmotorkatalysator zu erreichen, der auch Stickoxide zurückhält.

Die Nachrüstungsanforderungen an Fahrzeuge, die die Norm zukünftig nicht erfüllen können, werden damit immer aufwendiger. Deshalb achten die Nahverkehrsbetreiber bei der Beschaffung neuer Busse immer mehr darauf, dass Fahrzeuge, die 10 Jahre und länger im Einsatz sind, bereits zukünftige, noch strengere Umweltstandards erfüllen können.

Hinzu kommt, dass immer mehr Städte und Kommunen sogenannte Umweltzonen einführen, in denen höchste Anforderungen an Abgas- und Lärm-Emissionen von allen motorisierten Transportmitteln eingehalten werden müssen. In manchen Städten wie beispielsweise London sind diese Anforderungen zu bestimmten Tageszeiten so hoch, dass sie nur noch mit elektrischen Antrieben erfüllt werden können. Um einen Linienbetrieb in diesen Umweltzonen gewährleisten zu können, wird die Elektrifizierung der Busantriebe unausweichlich.





Quelle: PostAuto



Quelle: Ruter

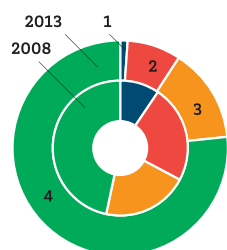
Laut Deutschem Automobilverband VDA können Busse durch die Elektrifizierung ihrer Antriebe einen sehr positiven Einfluss auf die Umweltqualität in den Städten nehmen. Schon heute kommen verstärkt Busse mit Hybridantrieben (Kombination von Verbrennungs- und Elektromotoren) zum Einsatz.

Sie ermöglichen – je nach Hybridisierungsgrad – Kraftstoffeinsparungen und Emissionsreduzierungen bis zu 20 Prozent gegenüber konventionellen Dieseln. Auf dem Weg zur Null-Emissions-Mobilität mit brennstoffzellenelektrischen Bussen stellt der Diesel-Hybridbus jedoch eine Brückentechnologie dar.

Erst der Einsatz von Brennstoffzellensystemen und Elektroantrieb ermöglicht einen emissionsfreien Buslinienverkehr ohne Einschränkungen bei Reichweite, Leistung, Fahrdynamik und Komfort.

Stadtbusse werden somit zum Vorreiter bei der Brennstoffzellentechnologie im Segment der schweren Nutzfahrzeuge. Die in den 30er Jahren des 20. Jahrhunderts aufkommenden oberleitungsgebundenen Busse werden auch in Zukunft eine untergeordnete Rolle spielen, da das Konzept für die meisten Städte zu große Einschränkungen im Bereich Kosten, Infrastruktur und Streckenflexibilität aufweist und aufwändige Baumaßnahmen erfordert.

Vergabe Feinstaubplaketten bei Bussen in Deutschland



	2008		2013	
1 Keine Plakette	2 293	9,5%	275	1,1%
2 Rote Plakette	5 672	23,5%	1 990	8,2%
3 Gelbe Plakette	4 924	20,4%	3 402	14,0%
4 Grüne Plakette	11 248	46,6%	18 571	76,6%
Gesamt	24 137	100,0%	24 238	100,0%

© VDV | Statistik 2013 | Quelle: VDV | Nur eigene, geleaste oder gecharterte Busse.

Im Jahr 2013 waren in Deutschland bereits rund 77 Prozent der Busse mit grüner Feinstaubplakette ausgestattet. Dazu gehören alle mit Partikelfilter ausgestatteten Fahrzeuge sowie alle Fahrzeuge der Abgasnorm Diesel EURO IV, V, VI, EEV, Hybrid sowie alle alternativen Antriebsarten.

3.1 KENNZEICHEN ELEKTRISCHER BUSANTRIEBE

Elektrobusse werden im Gegensatz zu konventionellen Bussen mit einem Elektromotor und Strom angetrieben. Der Strom wird an Bord erzeugt oder von außen zugeführt, denn elektrischer Strom lässt sich im Gegensatz zu fossilen Kraftstoffen nur bedingt speichern. Die wesentlichen Vorteile der Elektroantriebe im Vergleich zu Dieselmotoren sind ein deutlich leiserer Betrieb, keine schädlichen Emissionen beim Fahren und ein hoher Wirkungsgrad.

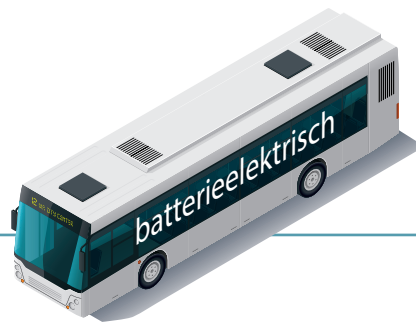
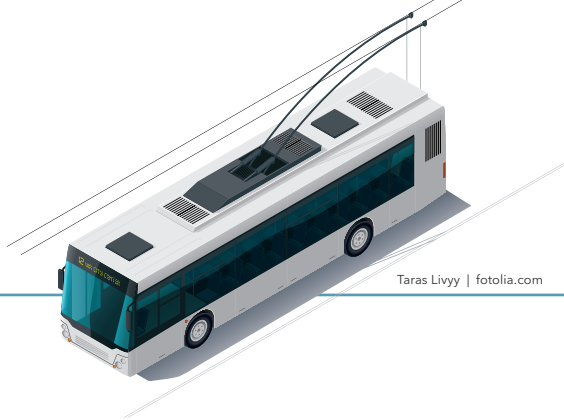
Der Elektromotor wandelt elektrischen Strom in das benötigte Antriebsdrehmoment um. Elektromotoren weisen gegenüber Verbrennungsmotoren ein hohes Drehmoment bereits bei niedrigen Drehzahlen auf, was sich sehr positiv auf das innerstädtische Fahrprofil mit häufigen Stopps, Anfahr-, Beschleunigungs- und Abbremsvorgängen auswirkt. Stadtbusse im Linienbetrieb können von dieser Eigenschaft besonders profitieren.

Elektromotoren haben darüber hinaus – anders als Verbrennungsmotoren – einen viel weiteren Drehzahlbereich und kommen somit ohne Getriebe aus. Das macht die Fahrzeuge deutlich leiser und für den Fahrer angenehmer zu fahren.

Elektromotoren haben weiterhin die Eigenschaft, dass sie als Generatoren, also zur Stromerzeugung eingesetzt werden können. So wandeln Elektromotoren beispielsweise die Energie, die beim Bremsen anfällt, in Strom um, der die Fahrzeugbatterie lädt. Diese Energie kann wiederum bei der Beschleunigung genutzt werden. Dadurch erhöhen sich der Gesamtwirkungsgrad des Antriebsstrangs sowie die Reichweite des Fahrzeugs. Die Rückgewinnung der Bremsenergie (Rekuperation) hat zudem Auswirkungen auf die Abnutzung der Bremsen, wodurch gesundheitsschädlicher Feinstaub durch Bremsabrieb vermindert wird.

Rekuperation

Anders als Fahrzeuge, die nur mit Verbrennungsmotoren betrieben werden, können Elektro- und Hybridfahrzeuge die Energie, die beim Bremsen entsteht, nutzen. Dieser Vorgang wird als Bremsenergierückgewinnung oder Rekuperation bezeichnet. Aufgrund seiner Masse und seiner Geschwindigkeit besitzt das Fahrzeug eine bestimmte Bewegungsenergie (kinetische Energie). Um das Fahrzeug zum Stillstand zu bringen, muss ihm diese Energie entzogen werden. Dies geschieht bei konventionellen – verbrennungsmotorischen – Fahrzeugen mit mechanischen Bremsen, die die Bewegungsenergie in Reibung und letztlich in Wärme umwandeln. Elektrofahrzeuge haben den Vorteil, die Bewegungsenergie (zumindest teilweise) zurückgewinnen zu können und für eine spätere Wiederverwendung zu speichern. Dies geschieht mithilfe des Elektromotors, der im Normalfall das Fahrzeug antreibt und beim rekuperativen Bremsen wie ein Generator/Dynamo betrieben wird und dann elektrische Energie – also Strom – erzeugt. Diese Energie lässt sich in einer Batterie speichern und wieder zum Fahren nutzen.



Stromzufuhr von außen: Trolleybusse

Die Stromzufuhr von außen ist bereits seit Jahrzehnten erprobt und wird in sogenannten Oberleitungs- oder Trolleybussen realisiert. Diese Busse haben flexible Stromabnehmer, die ähnlich wie bei einer Straßenbahn mit einem Oberleitungs-Stromnetz verbunden sind. Dafür ist jedoch ein eigenes Stromleitungsnetz erforderlich, das relativ hohe Investitionen und eine lange Bauzeit erfordert sowie hohe Unterhaltskosten verursacht. Das Stadtbild wird durch die auf dem Streckennetz installierten Oberleitungen geprägt, was zudem Auswirkungen auf den übrigen Straßen- und Schienenverkehr haben kann. Oberleitungsgebundene Busse können normalerweise nur auf den mit den Oberleitungen versehenen Strecken fahren und nicht ohne Weiteres umgeleitet werden oder wenden. Sie sind damit im Betrieb deutlich unflexibler als nicht leitungsgebundene Busse, haben aber einen entsprechenden Vorteil bei Emissionen und Lärm gegenüber konventionellen Dieselfbussen.

Stromspeicherung und -erzeugung an Bord: Batterien und Brennstoffzellen

Wenn nicht oberleitungsgebundene Busse ausschließlich elektrisch angetrieben werden sollen, kommt man nicht umhin, den für den elektrischen Antrieb benötigten Strom direkt an Bord zwischenzuspeichern oder zu erzeugen. Die Umwandlung von chemisch gespeicherter Energie in elektrischen Strom findet in Antriebssystemen mit Akkumulatoren und Brennstoffzellen statt. Akkumulatoren besitzen die Eigenschaft, dass sie wieder aufgeladen werden können. Umgangssprachlich hat sich der Begriff Batterie durchgesetzt, obwohl im Zusammenhang mit elektrischen Fahrzeugantrieben ausschließlich Akkumulatoren (Kurzform: Akku) eingesetzt werden.

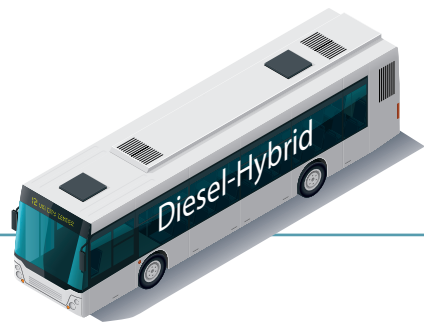
■ Batterieelektrische Busse

Man spricht in der Regel dann von einem batterieelektrischen Bus, wenn Akkus als ausschließliche oder dominierende Energiespeicher in einem Bus integriert sind und den Elektromotor mit Strom versorgen. Die Batterien werden dabei von außen durch Anschluss an das Stromnetz über mehrere Stunden (Normalladung) oder in weniger als einer Stunde (Schnellladung) geladen.

Die elektrische Kapazität (Energiedichte) von Batterien und Akkumulatoren hängt von ihrer Größe und chemischen Zusammensetzung ab. Aufgeladen werden sie durch den Anschluss an eine externe Steckdose, durch die Rückgewinnung der Bremskraft beim Fahren oder durch sogenannte Reichweitenverlängerer (Range Extender) an Bord der Fahrzeuge. Durch Fortschritte in der Batterie- und Ladetechnik kommen rein batterieelektrische Antriebe auch schon bei Stadtbussen mit 12 Metern beziehungsweise 18 Metern Länge pilothaft zum Einsatz. Sie werden z.B. während kurzer Stopps an den Haltestellen durch Induktion oder Schnellladung per Stromabnehmer (Pantograph) nachgeladen. Dazu ist dann eine entsprechende Schnelllade-Infrastruktur aufzubauen. Auch Trolleybusse mit zusätzlichen Energiespeichern an Bord, die während des Betriebes am Oberleitungsnetz geladen werden, um mit der gespeicherten Energie auch kurze Strecken abseits des Oberleitungsnetzes fahren zu können, gelten als Sonderformen.

Induktionsbasiertes Laden

Umgangssprachlich versteht man unter induktionsbasiertem Laden das Aufladen der Energiespeicher in Fahrzeugen ohne Kabel an festgelegten Kontaktpunkten wie beispielsweise Bushaltestellen oder vor Ampeln. Physikalisch steckt dahinter die Erzeugung elektrischer Ströme und Spannungen in elektrischen Leitern durch bewegte Magnetfelder.

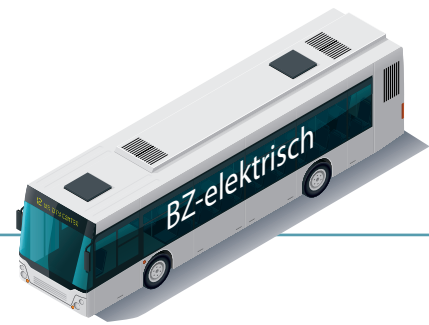


■ Diesel-Hybridbusse

Um die Reichweite und damit die Einsatzzeiten rein batterieelektrischer Busse zu erhöhen, werden derzeit Hybridkonzepte erprobt, die eine teilweise Elektrifizierung des Antriebs ermöglichen. So kommen Busse mit elektrischen Antriebsmotoren zum Einsatz, bei denen der Strom indirekt über einen Dieselmotor erzeugt wird. Man spricht dann von einem Diesel-Hybridbus.

Der Strom wird durch die Verbrennung des Dieselmotors in einem Dieselmotor, der wiederum einen Stromgenerator antreibt, erzeugt. Dieser Prozess geht mit Energieverlusten einher, da die chemisch gespeicherte Energie (Kraftstoff) zunächst in thermische Energie (Wärme), dann in kinetische Energie (Bewegung) umgesetzt wird, um anschließend mittels Generator in elektrischen Strom gewandelt zu werden, bevor letztendlich der Elektromotor und die Batterie gespeist werden und das Fahrzeug fahren kann.

Die Energieverluste durch das höhere Fahrzeuggewicht sowie durch die mehrstufige Energiewandlung können durch eine intelligente Steuerung der verschiedenen Antriebskomponenten in den verschiedenen Fahrmodi (anfahren, beschleunigen, bremsen, konstant fahren) nahezu ausgeglichen werden. Es wird versucht, den Dieselmotor vorwiegend im optimalen Drehzahlbereich zu betreiben, um damit Kraftstoff und Emissionen zu sparen. Beim Anfahren, Beschleunigen und Bremsen wiederum kommt vorwiegend der Elektromotor zum Einsatz, der in diesem Bereich seine Vorteile (hohes Drehmoment von Beginn an, Rekuperation) ausspielen kann.



■ Brennstoffzellenelektrische Busse

Brennstoffzellenelektrische Busse verwenden ein effizientes Brennstoffzellensystem in Kombination mit einem Wasserstoffspeicher zur Stromerzeugung an Bord. Die Kapazität des Antriebssystems ist dabei weitgehend unabhängig von der Größe und Leistung der Brennstoffzelle. Es kommt vielmehr auf den Energieinhalt des mitgeführten Treibstoffs im Tank an. Brennstoffzellen erzeugen Strom, solange Wasserstoff zugeführt wird. Dieser kann durch Nachtanken aufgefüllt werden, so wie man es von konventionellen Antriebssystemen mit Benzin, Diesel oder Erdgas kennt.

Brennstoffzellensysteme sind so leistungstark, dass sie schon heute in Stadtbussen der 12-Meter-Klasse sowie in Gelenkbussen bis 18 Meter eingesetzt werden können. Die am weitesten verbreitete Ausführung sind Brennstoffzellen-Hybridbusse der 12-Meter-Klasse, die in zahlreichen Demonstrationsprojekten weltweit zum Einsatz kommen. Die Kapazität der Wasserstoffspeicher ist so ausgelegt, dass der tägliche Linienbetrieb ohne Zwischentanken gefahren werden kann. Wie rein batterieelektrische Busse stoßen brennstoffzellenelektrische Busse beim Fahren keinerlei Emissionen aus und sind äußerst leise im Betrieb.

Andere als die hier genannten elektrochemischen Speicher finden in der Praxis kaum Anwendung. Es sei hier jedoch noch auf die technischen Möglichkeiten verwiesen, elektrische Energie mittels Doppelschichtkondensatoren direkt oder kinetische Energie beispielsweise mittels eines Schwungrades zu speichern. Diese Energiespeicher verfügen über eine äußerst geringe Speicherkapazität und kommen daher als primäre Energiespeicher für Busse nicht in Betracht.

3.2 AUSLEGUNG VON BRENNSTOFFZELLEN-ELEKTRISCHEN ANTRIEBEN

Das Antriebssystem von brennstoffzellenelektrischen Bussen wird heute typischerweise als Hybrid-system ausgelegt. Brennstoffzellenbusse kombinieren somit die Vorteile von batterieelektrischen und verbrennungsmotorischen Konzepten, ohne deren Nachteile zu übernehmen:

Busse mit Brennstoffzellensystemen ermöglichen ein rein elektrisches Fahren und stoßen während der Fahrt keinerlei Schadstoffemissionen aus. Durch die gezielte Auslegung der Speichersysteme (Batteriegröße und Wasserstofftank) und der Antriebsleistung (Brennstoffzellen- und Batteriesystem) auf die Anforderungen im Verkehr (Linienverkehr mit häufigem Halten und Anfahren an Bushaltestellen und Ampeln, Überlandverkehr mit längeren Konstantfahrten, anspruchsvolle Topographie) kann der Antrieb optimal eingestellt werden. Hinzu kommt die Rückgewinnung der Bremsenergie. Das alles führt zu einem hohen Wirkungsgrad und einem entsprechend geringeren Energieverbrauch.

Brennstoffzellenelektrische Busse können in kurzer Zeit betankt werden, so dass, anders als bei batterieelektrischen Fahrzeugen, keine Ausfallzeiten wäh-

rend des (mehrständigen) Ladevorgangs eingeplant werden müssen. Die Anforderungen an die Reichweite von Linienbussen im ÖPNV-Einsatz sind mit brennstoffzellenelektrischen Bussen heute bereits darstellbar. Die Wasserstofftanks der Busse sind so ausgelegt, dass der Inhalt zur Abwicklung des täglichen Linienbetriebs ausreicht. Die Betankung erfolgt entsprechend nach Betriebsschluss und während des nächtlichen Aufenthalts im Busdepot.

Da das zulässige Gesamtgewicht eines Busses festgelegt ist, wird in der Entwicklung darauf geachtet, dass das Mehrgewicht durch zusätzliche Antriebskomponenten die Passagierkapazität des Busses nicht wesentlich beeinträchtigt.

In den USA wurde vom Energieministerium (Department of Energy (DoE)) ein Kriterienkatalog für die Entwicklung von brennstoffzellenelektrischen Bussen veröffentlicht, der den Anforderungen an Linienbusse nicht nur in den USA Rechnung trägt. In der Tabelle auf der folgenden Seite werden die Ziele für Brennstoffzellenbusse im Jahr 2016 mit Erfahrungswerten für den derzeitigen Betrieb verglichen.

Hybridantrieb

In einem Hybridantrieb werden zwei Antriebssysteme (Energiewandler) oder zwei Energiespeichersysteme kombiniert. Zudem wird die Bremskraft zurückgewonnen. Energiewandler sind beispielsweise Brennstoffzellen, Elektro-, Otto- oder Dieselmotoren, Energiespeicher sind Akkumulator (Batterien), Kondensatoren (Super Caps) oder Kraftstofftank (mit Diesel, Benzin, Biokraftstoffen, Erdgas oder Wasserstoff).

Super Caps

Super Caps, auch Superkondensatoren, sind – wie Batterien – elektrochemische Energiespeicher, die kurzfristig sehr hohe Leistungen aufnehmen können. Allerdings ist die Kapazität (Energiedichte) begrenzt und es findet eine schnelle Selbstentladung statt. Daher eignet sich dieser Speicher nicht zur langfristigen Speicherung der Antriebsenergie, sehr gut jedoch zur Speicherung und Abgabe von Leistungsspitzen, etwa beim Bremsen und Anfahren eines Busses mit Rekuperation.

Ziele für Brennstoffzellen-Busse im Jahr 2016

	Status quo (Stand 2012)	Ziel 2016
Lebensdauer	5 Jahre / 100.000 km	12 Jahre / 500.000 km
Verfügbarkeit	60 %	85 %
Bus Kosten	1.500.000 €	450.000 €
Wartungskosten insgesamt	1,44 €/km	0,90 €/km
Reichweite	430 km	480 km
Wasserstoffverbrauch	8-13 kg / 100 km	8,75 kg / 100 km

Quelle: DoE Department of Energy, Fuel Cell Buses in U.S. Transit Fleets: Current Status 2012, USA [1€=1,33\$]

Unterschiede in der Auslegung und Konstruktion zu Dieselnissen

Das modulare Design von Brennstoffzellen-Antriebssystemen ermöglicht im Vergleich zu Dieselnissen neue Bauraumanordnungen für die Antriebssysteme. Daraus ergeben sich erweiterte Konstruktionsmöglichkeiten, die brennstoffzellenelektrische Busse beispielsweise im Hinblick auf die Wartungsfreundlichkeit verbessern (leichterer Zugang zu den Komponenten und Modulen und damit ein einfacherer Ein- und Ausbau). Durch die Stromerzeugung mit Brennstoffzellen ergibt sich die Möglichkeit, Komponenten wie Pumpen und Klimaanlage mittels Hilfsmotoren elektrisch anzutreiben und nicht durch mechanische Riementriebe, wie es bei Dieselnissen der Fall ist. Das bietet die Möglichkeit, den Wirkungsgrad des gesamten Fahrzeugs weiter zu verbessern. Ein weiterer Unterschied ist das Temperaturniveau der Abwärme. Da die Betriebstemperatur und Abgastemperatur von Brennstoffzellen deutlich niedriger ist als bei Verbrennungsmotoren, sind zum Beheizen des Businnenraums (elektrische) Zusatzheizungen in den Kühlkreis eingebaut.

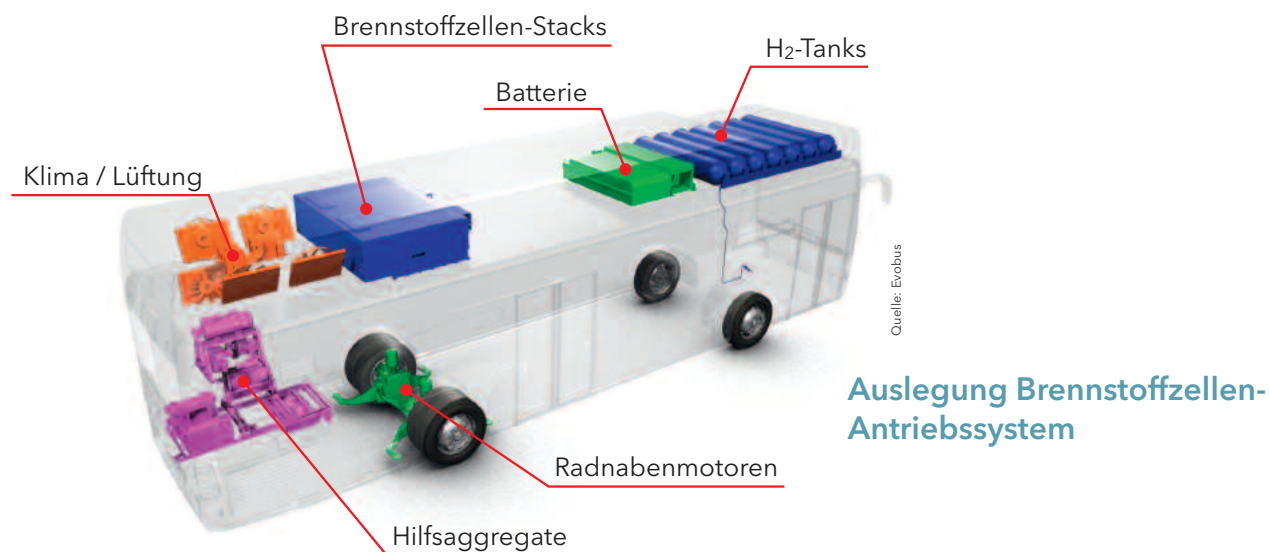
Weitere Kriterien

Für die Passagiere gibt es zwischen brennstoffzellenelektrischen und konventionellen Bussen bis auf die geringeren Fahrgeräusche grundsätzlich keinen Unterschied. Dennoch haben Fahrzeuge mit Brennstoffzellensystemen Merkmale, mit denen sich insbesondere Betreiber, Fahrer und das Werkstattpersonal – wie bei der Einführung jeglicher neuer Technik – vertraut machen müssen. Busfahrer erhalten dazu eine Schulung sowohl auf das Fahrzeug als auch im Umgang mit der Tankstelle. Das Werkstattpersonal wird in die Technik eingearbeitet oder externe Wartungsdienstleister mit dem Service beauftragt.

Der Werkstatt- und Servicebereich für die brennstoffzellenelektrischen Busse wird zu Beginn auf die Anforderungen des neuen Treibstoffs Wasserstoff hin ausgelegt. Typischerweise werden dazu Wasserstoffsensoren in der Werkstatt und in den Depotgaragen an geeigneter Stelle installiert und das Lüftungssystem entsprechend modifiziert. Da sich zahlreiche Komponenten des Brennstoffzellensystems auf dem Dach der Busse befinden, ist es sinnvoll, mit Arbeitsbühnen und Leitern einen entsprechenden Zugang zu diesen Komponenten vorzusehen.

International wird versucht, möglichst einheitliche Normen und Standards beim Einsatz von brennstoffzellenelektrischen Bussen, der dazugehörigen Tankinfrastruktur oder der Ausstattung von Werkstätten zu schaffen.

Die zahlreichen Demonstrationsprojekte, die seit vielen Jahren laufen, haben inzwischen so viele Erfahrungs- und Richtwerte geliefert, dass ein problemloser und sicherer Betrieb dieser innovativen Busse schon heute möglich ist.



Vergleich Elektroantriebe für Stadtbusse: Brennstoffzellen-Hybrid, Batterie, Diesel-Hybrid, Verbrennungsmotor mit Erdgas und Diesel

	Brennstoffzellen-Hybrid	Batterie	Diesel-Hybrid	Verbrennungsmotor (Erdgas)	Verbrennungsmotor (Diesel)
Kraftstoff	Wasserstoff	Strom	Diesel	Erdgas	Diesel
(Energie-)Speicher	H ₂ -Tank, Batterie und Super Caps	Batterie	Dieseltank und Batterie (derzeit Li-Ionen)	Erdgastank	Dieseltank
Tank- / Ladezeit	wenige Minuten	Normalladung mehrere Stunden/ Schnellladung unter 1 Stunde	wenige Minuten	wenige Minuten	wenige Minuten
Emissionen (CO₂ / Schadgase)	keine	keine	20 % Verbesserung gegenüber konventionellem Dieselantrieb	CO ₂ , weniger als bei Diesel	Hoch: CO ₂ , NO _x , Rußpartikel
Wirkungsgrad im Betrieb	hoch	hoch	Bis zu 20 % höher als konventioneller Dieselantrieb	gering	gering
Herausforderungen	Kosten/Infrastruktur/Lebensdauer	Reichweite/Ladezeit/Infrastruktur/Lebensdauer	Gewicht, Wirkungsgrad, Kosten, Schadstoffemissionen	Verbrauch, Schadstoffemissionen	Verbrauch, Schadstoffemissionen



Quelle: Linde

Wasserstofftank an der Linde-Tankstelle in Unterschleißheim

3.3 BETANKUNGS-INFRASTRUKTUR

Für den Betrieb von Brennstoffzellenbussen sind Wasserstoff-Tankstellen* erforderlich. Wasserstoff wird wie Erdgas in gasförmigem Zustand und unter hohem Druck getankt, wodurch sich entsprechende Anforderungen an die Tankstelle ergeben.

Wie im öffentlichen Personennahverkehr üblich, wird es beim Einsatz von brennstoffzellenelektrischen Bussen praktisch sein, eine eigene Wasserstoff-Tankstelle auf dem Betriebsgelände oder in der näheren Umgebung zu errichten. Dies erlaubt eine problemlose Betankung nach Betriebsschluss oder über Nacht, wenn sich die Busse im Depot befinden. Bei der Planung und Standortwahl für die Wasserstoff-Tankstelle sollte geprüft werden, ob Wasserstoff bereits in der Region zur Verfügung steht und Partner (Energieversorger, Stadtwerke) eingebunden werden können. Dies ist gerade in der Marktvorbereitungsphase, in der die Infrastrukturen für

Wasserstoff noch nicht optimal ausgebildet sind, ein nützlicher Ansatz, Risiken und Kosten auf mehrere Schultern zu verteilen.

Dies könnte der Fall sein, wenn neben den brennstoffzellenelektrischen Bussen im ÖPNV weitere brennstoffzellenelektrische Fahrzeug in der Region eingesetzt werden sollen oder bereits Chemieanlagen, Raffinerien oder Produktionsanlagen für die großtechnische Erzeugung von Wasserstoff vorhanden sind. Wasserstoff ist seit über 100 Jahren ein wichtiges Gas in der Chemie- und Grundstoffindustrie beispielsweise für die Herstellung von Düngemitteln und Methanol. Das Gas wird ebenfalls in der Stahl- und Glasindustrie sowie in der Halbleiter- und Lebensmittelindustrie verwendet. In der chemischen Industrie fällt Wasserstoff als Nebenprodukt der Chlorherstellung an, ohne dass es vor Ort eine weitere Verwendung für den Wasserstoff gibt.



Quelle: Linde

Linde Wasserstoff-Tankstelle in Unterschleißheim

* Ausführliche Informationen über die Wasserstoff-Infrastruktur bietet die Broschüre Wasserstoff-Tankstellen, herausgegeben vom Hessischen Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 2010

Praxisbeispiel Wasserstoff-Tankstelle Infraserb Hoechst, Frankfurt

Im Industriepark Hoechst bei Frankfurt fallen heute jährlich 30 Millionen (zukünftig bis zu 45 Millionen) Kubikmeter Wasserstoff in einer Chemeanlage als Nebenprodukt an. Im Rahmen des europäischen Förderprojekts ZeroRegio wurde dort eine Wasserstoff-Tankstelle aufgebaut. Sie ist Teil einer konventionellen Agip Tank- und Servicestation. Mittels einer eigens installierten Hochdruck-Pipeline wird der Wasserstoff zur Tankstelle befördert, wo er an zwei Zapfsäulen getankt werden kann.



Praxisbeispiel HyCologne - Cluster für Wasserstoff, Brennstoffzellen & Elektromobilität in der Region Köln/Rheinland

Im Chemiepark Knapsack in Hürth bei Köln fällt Wasserstoff als Nebenprodukt bei der Chlorerzeugung an. Im Rahmen des Projekts „Chemergy“ wurde mit dem Aufbau einer Wasserstoff-Tankstelle ein öffentlicher Zugang zu der bislang geschlossenen Chemie-Infrastruktur geschaffen und Wasserstoff als Energieträger nutzbar gemacht. An der Tankstelle werden unter anderem brennstoffzellenelektrische Busse betankt, die im öffentlichen Nahverkehr in der Region im Einsatz sind.



Weitere Informationen unter www.hycologne.de



Der Einsatz von Wasserstoff als Energieträger im Straßenverkehr in Verbindung mit Brennstoffzellen-Fahrzeugen wird seit vielen Jahren im Rahmen von zahlreichen Pilot- und Demonstrationsprojekten weltweit erprobt. Die Vorteile der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie – überragende Energieeffizienz, geräusch- und vibrationsarmer Betrieb ohne Schadstoffausstoß, hoher Komfort für die Passagiere, regenerative und dezentrale Herstellung sowie Speicherung des Wasserstoffs – liegen vor dem Hintergrund von Umwelt- und Klimaschutz auf der Hand.

Allerdings ist die Markteinführung und kommerzielle Nutzung von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen auch im Busverkehr noch mit einer Reihe von Herausforderungen verbunden, die sich jedoch durch industrie- und branchenübergreifende Kooperationen heute schon lösen lassen.

Über den Tellerrand blicken und Interessen bündeln

Wenn brennstoffzellenelektrische Busse im öffentlichen Personennahverkehr zum Einsatz kommen sollen, dann kann eine Zusammenarbeit mit gleichgesinnten Mitstreitern aus anderen Bereichen eine Realisierung entscheidend vorantreiben. Gemeinsam lassen sich die Rahmenbedingungen, die für einen erfolgreichen, marktorientierten Einsatz der H2BZ-Technologie wünschenswert sind, besser und nachhaltiger gestalten und umsetzen. Außerdem verteilen sich dadurch Arbeit und Kosten auf mehrere Schultern. Die meisten Unternehmen und Vertreter der öffentlichen Hand sind lokal und regional exzellent vernetzt. Sie wissen, welche Aktivitäten auf lokaler Ebene im Bereich Umweltschutz, Nachhaltigkeit und Mobilität laufen und an welchen Innovationen gearbeitet wird. So kommen die nachstehenden vielfältigen Aktivitäten in einer Kommune zusammen, die gebündelt zu einem Innovationsschub führen und neue Arbeitsplätze schaffen können.

- Die Nahverkehrsbetreiber im regionalen Verkehrsverbund möchten aufgrund sich verschärfender Umweltauflagen ihre Busflotten nach und nach auf umweltfreundliche und effiziente Antriebe umstellen.
- Es gibt in der Region verschiedene Produktions- und Logistikbetriebe, die an sauberen und effizienten Lösungen für ihre Flurförderzeuge interessiert sind.
- Das eine oder andere kleine oder mittelständische Unternehmen in der Nachbarschaft hat ein Solardach installiert und speist überschüssigen, regenerativ erzeugten Strom ins Netz ein.
- Die Landwirte im Umland betreiben Biogasanlagen und speisen ebenfalls den Strom ins Netz ein.
- Beim lokalen Chemieunternehmen entsteht in den Herstellungsprozessen verschiedener Chemikalien Wasserstoff als Abfallprodukt.
- Die ansässige Hochschule engagiert sich bereits in einem H2BZ-Förderprojekt und begleitet es wissenschaftlich. Es gibt dort ausgewiesene Experten, außerdem wird dort ein Elektrolyseur für die dezentrale Wasserstofferzeugung betrieben.
- Ein örtlicher Autovermieter möchte sein Angebot um neue Mobilitäts- und Car-Sharing-Konzepte ergänzen und Fahrzeuge mit innovativen Antriebskonzepten anbieten.
- Der Bürgermeister möchte seine Stadt mit einem ökologischen und zukunftsorientierten Image für die Ansiedelung von neuen Unternehmen und Bürgern attraktiver machen.

Praxisbeispiel Hydrogen Bus Alliance

Viele Nahverkehrsunternehmen haben großes Interesse am Einsatz innovativer brennstoffzellenelektrischer Busse. Sie haben sich in der Initiative Hydrogen Bus Alliance zusammengeschlossen, die die gemeinsame Beschaffung dieser Busse vorsieht, um so frühzeitig den Buserstellern Planungssicherheit bei der Produktion entsprechender Stückzahlen aufzuzeigen, was zu sinkenden Kosten führt.

Zu den beteiligten Städten und Regionen gehören: Amsterdam (Betreiber: GVB), Niederlande; Barcelona (TNB) und Madrid (EMT), Spanien; Berlin (BVG); British Columbia (BC Transit), Kanada; Köln (Regionalverkehr Köln), Hamburg (Hamburger Hochbahn); London (Transport for London), England; Oslo (Ruter), Norwegen; Aargau (PostBus), Schweiz; Bozen (IIT), Italien; Westaustralien (Public Transport Authority of Western Australia).

Diese Städte sind auf ihrem Kontinent jeweils Vorreiter beim Einsatz neuer Bustechnologien und sauberer Kraftstoffe für einen klimafreundlichen öffentlichen Personennahverkehr. Gegenwärtig repräsentieren die beteiligten Städte eine Busflotte mit über 12.000 Bussen und einer jährlichen Beschaffungskapazität von über 1.200 Fahrzeugen. Weitere Städte haben angekündigt, sich der Initiative anzuschließen.

Weitere Informationen unter www.hydrogenbusalliance.org



Hydrogen Bus Alliance

Der Einsatz von brennstoffzellenelektrischen Bussen im öffentlichen Personennahverkehr kann den H2BZ-Markt öffnen und die Einführung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen und weiteren Brennstoffzellen-Anwendungen beschleunigen. Wenn die Betankung im Busdepot erfolgt (Stichwort: Return-to-Base-Betrieb), kann mit einer einzelnen Tankstelle auch

ohne flächendeckendes Wasserstoff-Tankstellennetz der Busbetrieb realisiert werden. Die Nutzung der Busse lässt sich darüber hinaus öffentlichkeitswirksam inszenieren und erlaubt jedem Bürger als Passagier frühzeitig den Kontakt und die Erfahrung mit der Brennstoffzellentechnologie.

Europaweite Demoprojekte mit brennstoffzellenelektrischen Bussen

1

2

4

5

6

8

7

9

10

11

12

13

- | | | |
|----|------------------|---|
| 1 | Aberdeen | Bushersteller: VanHool
10 Standardbusse, 13 m |
| 2 | London | Bushersteller: Wright
8 Standardbusse, 12 m |
| 3 | Oslo | Bushersteller: VanHool
5 Standardbusse, 13 m |
| 4 | Amsterdam | Bushersteller: APTS
2 Gelenkbusse, 18 m |
| 5 | Antwerpen | Bushersteller: VanHool
5 Standardbusse, 13 m |
| 6 | Hamburg | Bushersteller: Evobus
4 Standardbusse, 12 m
Bushersteller: Solaris
2 Gelenkbusse, 18 m |
| 7 | Herten | Bushersteller: Technobus
3 Midibusse, 6 m |
| 8 | Köln | Bushersteller: APTS
2 Gelenkbusse, 18 m
Bushersteller: VanHool
2 Standardbusse, 13 m |
| 9 | Karlsruhe | Bushersteller: Evobus
2 Standardbusse, 13 m |
| 10 | Stuttgart | Bushersteller: Evobus
4 Standardbusse, 12 m |
| 11 | Aargau | Bushersteller: Evobus
5 Standardbusse, 12 m |
| 12 | Mailand | Bushersteller: Evobus
3 Standardbusse, 12 m |
| 13 | Bozen | Bushersteller: Evobus
5 Standardbusse, 12 m |

Praxisbeispiel

HYCHAIN MINI-TRANS (2006-2011)

HYCHAIN MINI-TRANS war ein Demonstrationsprojekt, bestehend aus 25 europäischen Partnern, das mit Mitteln aus dem sechsten Forschungsrahmenprogramm der Europäischen Union gefördert wurde. Das Projekt ermöglichte Kommunen und Unternehmen aus vier europäischen Regionen – Rhône-Alpes in Frankreich (Metropolregion Grenoble Alpes), Castilla y León in Spanien (Stadt Soria), Emscher-Lippe-Region in Nordrhein-Westfalen und die Stadt Modena in Italien – eine Fahrzeugflotte von über 50 unterschiedlichen Brennstoffzellen-Fahrzeugen zu testen. Dazu gehörten kleine Nutzfahrzeuge, Midibusse, Rollstühle, Roller und Cargobikes.



Praxisbeispiel

HyFLEET:CUTE (2006-2009)

Im Rahmen des HyFLEET:CUTE-Projekts wurden in 10 Städten auf drei Kontinenten insgesamt 47 wasserstoffbetriebene Busse (33 Busse mit Brennstoffzellensystem und 14 Busse mit Verbrennungsmotor) im Linienverkehr eingesetzt. Ziel war es, den Busverkehr durch die Entwicklung von wasserstoffbasierten Antriebssystemen zu diversifizieren, um dadurch Verbrauch und Emissionen zu reduzieren. Der Aufbau einer Infrastruktur für Wasserstoff war ebenfalls Bestandteil des Projekts. Am Projekt waren 31 Partner beteiligt. Die Busse kamen in folgenden Städten zum Einsatz: Amsterdam (Niederlande), Barcelona und Madrid (Spanien), Peking (China), Berlin und Hamburg (Deutschland), London (Großbritannien), Luxemburg, Perth (Australien) und Reykjavik (Island).

Weitere Informationen unter

www.global-hydrogen-bus-platform.com



4.1 WIRTSCHAFTLICHKEIT UND BETRACHTUNG DER TOTAL COST OF OWNERSHIP (TCO)

Wie bei jeder neuen Technik ist das Kostenniveau von Bussen mit Brennstoffzellentechnologie zu Beginn der Markteinführung deutlich höher als bei der etablierten Technik (Dieselbusse). Erst mit steigenden Stückzahlen, optimierten Produktionsprozessen und durch Weiterentwicklungen sinkt der Preis auf ein wettbewerbsfähiges Niveau.

Für die wirtschaftliche Bewertung eines Fahrzeugs oder einer Fahrzeugflotte sollten nicht nur die Anschaffungs- und Treibstoffkosten in Betracht gezogen werden. Vielmehr müssen Wartungs-, Personal-, Versicherungs- sowie Unfall- und Folgekosten beachtet werden, die unter dem Begriff Total Cost of Ownership (TCO) zusammengefasst werden.

Total Cost of Ownership (TCO)

Unter den Total Cost of Ownership oder Lebenszykluskosten werden alle Kosten zusammengefasst, die mit Anschaffung, Betrieb, Wartung und Entsorgung von Firmeninventar verbunden sind. Damit können direkte und indirekte Kosten bereits im Vorfeld einer Investitionsentscheidung identifiziert werden.

Neben den sicherlich wichtigen Kostenaspekten beim Einsatz von brennstoffzellenelektrischen Bussen sollte nicht vergessen werden, dass mit dem Einsatz innovativer Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien das Image und die Attraktivität einer Stadt und des Nahverkehrsunternehmens erhöht, neue Zielgruppen erschlossen und zusätzliche Fahrgäste gewonnen werden können.

Um möglichst viele Erfahrungen mit den innovativen Bussen zu sammeln sowie die Beschaffung und den Einsatz in Städten und Nahverkehrsbetrieben zu ermöglichen, wurden auf europäischer und nationaler Ebene Förderprogramme aufgelegt. Mit diesen Fördermaßnahmen sollen Städte und Nahverkehrsbetreiber heute die Weichen für die Zukunft stellen, denn Busse sind mindestens 12 Jahre im Einsatz. Das heißt, schon jetzt muss mit der Einführung von innovativen Antriebstechnologien begonnen werden, um die weiter steigenden Umweltauforderungen und Klimaziele 2025 und danach erreichen zu können.

Bei einer Betriebsdauer von 12 Jahren für einen Bus im ÖPNV müssen also die TCO für die nächsten 12 Jahre abgeschätzt werden. Betrachtet man beispielsweise den Ölpreis der vergangenen 12 Jahre, wird deutlich, dass starke Schwankungen möglich sind.

Wasserstoff ist als sekundärer Energieträger, der auf verschiedenen Wegen gewonnen werden kann, deutlich unempfindlicher gegenüber Preisschwankungen von einzelnen Rohstoffen, als dies bei Dieselmotoren der Fall ist. Auch vor einer eventuellen Besteuerung von CO₂-Emissionen ist Wasserstoff bei regenerativen Herstellungsverfahren befreit. Zudem ist aufgrund der Lern- und Skaleneffekte von sinkenden Preisen bei Bus- und Tankstellentechnik auszugehen.

Laut der europäischen Busstudie „Urban buses: alternative powertrains for Europe“, die von der Industrie sowie vom europäischen Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU) unterstützt wurde, könnten brennstoffzellenelektrische Busse unter bestimmten Voraussetzungen vor 2030 bereits Vorteile bei dieser Kostenbetrachtung gegenüber Dieselmotoren erreichen. Dies gilt insbesondere dann, wenn die Produktionsmethoden für Wasserstoff sowie Brennstoffzellen und Batterien früher deutlich günstiger werden, der Ölpreis stärker steigt und sich die Dieselbesteuerung erhöht.

Prognostizierte TCO-Entwicklung bei Dieselmotoren und brennstoffzellenelektrischen Bussen

	2012	2020	2030
12-m-Dieselmotor	2,10 €/km	2,30 €/km	2,50 €/km
12-m-Brennstoffzellenbus	4,60 €/km	3,30 €/km	3,20 €/km
18-m-Dieselmotor	2,50 €/km	2,80 €/km	3,20 €/km
18-m-Brennstoffzellenbus	5,40 €/km	3,90 €/km	3,80 €/km

Quelle: Europäische Busstudie „Urban buses: alternative powertrains for Europe“, 2012

Annahmen: keine Fördermittel, Ölpreis unter 125 Dollar pro Barrel, keine CO₂-Besteuerung

TCO-Betrachtung unterschiedlicher hybrider Busantriebe im Vergleich zum Dieselbus (beim heutigen Entwicklungsstand der Antriebssysteme)

	Elektrobus mit Brennstoffzelle	Diesel-Hybridbus	Dieselbus
Anschaffungskosten Fahrzeug	derzeit am höchsten, wird aber durch umfangreiche Fördermittel gemildert	höher als konventionelle Dieselbusse	im Vergleich am geringsten, ggfs. Nachrüstkosten aufgrund strengerer Umweltsetze
Kraftstoff-/Energiekosten	abhängig vom H ₂ -Preis: derzeit ca. 4 €/kg. Bei einem Verbrauch von ca. 10 kg/100 km ergeben sich ca. 40 €/100 km.	Einsparungen bis zu 20 Prozent gegenüber konventionellen Dieselbussen	abhängig vom Dieselpreis: derzeit ca. 1,50 €/l mit steigender Tendenz durch höheren Ölpreis. Bei einem Verbrauch von ca. 30 l/100 km ergeben sich ca. 45 €/100 km.
Betriebsdauer	Rund-um-die-Uhr-Betrieb möglich. Aktuell werden die Busse 8-16 Std. täglich/bis zu 7 Tage die Woche eingesetzt	wie konventionelle Dieselbusse	Rund-um-die-Uhr-Betrieb möglich. Aktuell sind die Busse im Schnitt 18 Std. täglich an ca. 320 Tagen pro Jahr im Einsatz
Lebensdauer	min. 5-12 Jahre	10-12 Jahre mit Batteriewechsel	10-12 Jahre
Umweltverträglichkeit	sehr gut: im Betrieb null Emissionen und leise; ideal bei regenerativer H ₂ -Erzeugung	rund 20 Prozent Verbesserung gegenüber konventionellen Dieselbussen	schlecht - CO ₂ , Stickoxide, Dieselpartikel, Feinstaub
Reichweite	rein elektrisch für regulären Linienbetrieb ausreichend	wie konventionelle Dieselbusse	derzeit am größten
E-Betrieb	uneingeschränkt elektrisch	reiner E-Betrieb praktisch nicht relevant	nicht möglich
Zusatznutzen	null Emissionen, Nutzung erneuerbarer Energien für H ₂ -Erzeugung	Energieeinsparungen durch höhere Effizienz	optimierte, verlässliche Antriebstechnologie

Quelle: eigene

Ziel der Hersteller ist es, bei Kommerzialisierung der Brennstoffzellenbusse sowohl technisch als auch wirtschaftlich mit Dieselbussen gleichzuziehen. Dieses Ziel ist in den kommenden Jahren erreichbar.

4.2 EINE FRAGE DER ZEIT: ELEKTRISCHE BZW. BRENNSTOFFZELLEN-ELEKTRISCHE BUSSE EROBERN DEN LINIENVERKEHR

Selbst wenn Busse mit Batterie- bzw. Brennstoffzellensystem beim heutigen Entwicklungsstand und unter den gegenwärtigen Rahmenbedingungen (Gesetzgebung, Energieversorgung, Elektromobilität, Stadt-/Verkehrsentwicklung, Vernetzungsgrad) ungefördert noch nicht wettbewerbsfähig sind, so zeigen insbesondere die Debatten im Rahmen der deutschen Energiewende, dass die Elektrifizierung der Antriebe ein ganz wesentlicher Aspekt zukünftiger Mobilität ist. Mit Wasserstoff als Energieträger und -speicher kann darüber hinaus ein ganzheitliches Versorgungssystem aufgebaut werden, in dem die Sektoren Verkehr und Energieversorgung – anders als heute – miteinander verbunden sind. Die Antriebsvielfalt nimmt zu. Dabei hat jede Antriebsform ihre spezifischen Vor- und Nachteile. Der beste Antrieb kann nur im Kontext seines Einsatzprofils bestimmt werden und es obliegt dem Betreiber beziehungsweise Fahrzeugnutzer, das passende Antriebskonzept auszuwählen.

Die Erfahrungen aus den Demonstrations- und Förderprojekten mit brennstoffzellenelektrischen Bussen in den vergangenen 10 Jahren zeigen, dass die Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie im

Vergleich zu anderen Antriebstechnologien die gegenwärtigen Anforderungen im Hinblick auf Kundennutzen, Umweltfreundlichkeit und Zukunftsfähigkeit gut erfüllen kann. Die derzeit größte Herausforderung sind die Kosten, die auf ein verträgliches Maß gesenkt werden müssen. In der Übergangszeit helfen geeignete Förderprogramme.

Die technischen Entwicklungen und Kostenoptimierungen bei Elektrobussen schreiten fort, so dass Brennstoffzellen- und Bushersteller davon ausgehen, dass brennstoffzellenelektrische Busse in absehbarer Zeit auf allen Ebenen mit Dieselnissen gleichziehen. Dies gilt insbesondere für Lebensdauer und Verfügbarkeit sowie Gewicht und Volumen des Antriebsstrangs. Was den Wartungsaufwand angeht, werden Busse mit Brennstoffzellensystemen den Dieselnissen aufgrund ihrer modularen Bauweise und weniger beweglichen Teilen zukünftig sogar überlegen sein. Beim Energieverbrauch und dem Wirkungsgrad sind sie es heute schon.

Ähnliche Effekte werden sich bei den Tankstellen und der Wasserstoffherzeugung ergeben. Zusätzlich zu den technischen Verbesserungen ist mit der Vereinfachung der Genehmigungsverfahren und der Verfügbarkeit von planungssicheren Betriebsdaten zu rechnen. Auch die steigende Akzeptanz und vielfache Begeisterung bei Fahrern und Passagieren unterstützen den Einsatz innovativer Brennstoffzellenbusse. Alle genannten Punkte erleichtern die Planbarkeit für Neuanschaffungen und erhöhen die Wirtschaftlichkeit. Mehr Busse pro Verkehrsbetrieb erhöhen außerdem die Auslastung der Tankstelle und versprechen eine schnellere Amortisierung der Investitionen in Tankstelle, Serviceinfrastruktur und Fahrerschulungen.



Quelle: EvoBus



Weltweit sind inzwischen Dutzende batterie- und brennstoffzellenelektrische Busse im Einsatz, die zusammen etliche Millionen Kilometer im Linienbetrieb gefahren sind. Täglich haben die Passagiere in zahlreichen Städten heute schon die Möglichkeit, die Technologien im Alltag zu erleben. Nahverkehrsunternehmen und -betreiber, Busfahrer und Werkstatt-

personal sammeln Erfahrungen im Umgang mit den Fahrzeugen sowie der Lade- bzw. Betankungs-Infrastruktur und stellen sie im Rahmen der laufenden Demonstrationsprojekte anderen zur Verfügung. Somit können sich Städte und Nahverkehrsbetreiber frühzeitig mit den Neuerungen befassen und sich vorausschauend auf die Veränderungen einstellen.

Praxisbeispiel CHIC (seit 2010)

CHIC (2010-2016) - Clean Hydrogen in European Cities

Das europäische CHIC-Projekt setzt das HyFLEET:CUTE-Programm fort. Neben dem Ziel, die Einführung von brennstoffzellenelektrischen Bussen voranzubringen, geht es für die beteiligten Städte darum, den CO₂-Ausstoß ihrer Busflotten zu reduzieren. Darüber hinaus soll der Erfahrungsaustausch zwischen Städten gefördert werden, die bereits BZ-Busse einsetzen und Wasserstofftankstellen aufgebaut haben und solchen, die sie zukünftig nutzen wollen. Im Rahmen des CHIC-Programms wurden 26 Busse mit modernsten Brennstoffzellen-Antriebssystemen aufgebaut und in fünf europäischen Städten – Aargau (Schweiz), Bozen und Mailand (Italien), London (Großbritannien) sowie Oslo (Norwegen) – im Alltagsbetrieb eingesetzt. Am Projekt sind 23 europäische Partner (u. a. Bushersteller, Infrastrukturlieferanten, Nahverkehrsbetreiber und Forschungseinrichtungen) aus acht Ländern beteiligt. Das Projekt wird von der europäischen H2BZ-Initiative Joint Undertaking for Fuel Cells and Hydrogen (FCH JU) mit knapp 26 Mio. Euro gefördert. Städte wie Köln, Hamburg, Berlin und Whistler (Kanada), die bereits brennstoffzellenelektrische Busse betreiben, tauschen ihre Projektergebnisse und -erfahrungen mit den CHIC-Partnern aus.

Weitere Städte in Deutschland, Frankreich, Großbritannien, den Niederlanden, Norwegen und des Baltikums planen, sich anzuschließen, um an einem wasserstoffbasierten, öffentlichen Personennahverkehr in Europa mitzuwirken.

Weitere Informationen unter www.chic-project.eu



Im Überblick: Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken von brennstoffzellen-elektrischen Bussen mit Wasserstoff als Kraftstoff – Stand heute

Stärken	■ Lokal emissionsfrei (kein CO₂, keine Stickoxide, keine Rußpartikel) ■ Leiser Betrieb ■ Höherer Wirkungsgrad als Dieselbusse ■ Potenziell deutlich robuster und damit wartungsärmer als Dieselbusse ■ Gesamte Energiekette (vom Bohrloch zum Rad / well-to-wheel) ohne Emissionen, wenn Wasserstoff aus erneuerbaren Energien erzeugt wird ■ Geregelte Elektrolyse zur Wasserstoffgewinnung kann Strompreise auch bei steigendem regenerativen Anteil zeitlich glätten
Schwächen	■ Derzeit sowohl in der Anschaffung als auch bei den TCO noch teurer als konventionelle Busse ■ Wasserstoff derzeit noch teurer in der Bereitstellung (ohne Steuern bestenfalls gleich teuer) als Dieselmotorkraftstoff ■ Zusätzliche Infrastruktur (Tankstellen usw.) nötig ■ Neue Technologie: „Kinderkrankheiten“, Akzeptanz, Kosten, Zuverlässigkeit, etc.
Chancen	■ Brennstoffzellenelektrische Busse erfüllen schon heute die Anforderungen an zukünftige, immer strengere Umwelt- und Klimagesetze bezüglich Schadstoff-, CO₂- und Lärmemissionen in Städten und Ballungsgebieten ■ Steigende Stückzahlen, sich entwickelnde Zulieferermärkte und Fortschritt auf der Lernkurve führen zu wettbewerbsfähigen Anschaffungspreisen ■ Verlängerte Lebensdauer der Komponenten sowie eine höhere Besteuerung auf fossile Treibstoffe führen zu besseren TCO ■ Wasserstoff als Kraftstoff ermöglicht Umstieg des Verkehrssektors auf erneuerbare Energiequellen ■ Wasserstoffkosten sind mit Ausbau der erneuerbaren Energien langfristig besser kalkulierbar als Mineralölkosten ■ Elektrolyse ermöglicht dezentrale Erzeugung von Wasserstoff am Ort der Verwendung: H₂ kann nicht nur als Kraftstoff für Busse, sondern auch für die Energieversorgung des Busdepots u. a. durch Kraft-Wärme-Kopplung verwendet werden ■ Neue Geschäftsmodelle durch eigene Wasserstoff-Tankstelle: Wasserstoff lässt sich als Stromspeicher bzw. zur Netzstabilisierung vermarkten ■ Risikostreuung durch schrittweisen Ausbau des Wasserstoff-Fuhrparks ■ Nebenprodukt-Wasserstoff in der Umgebung verfügbar, zum Beispiel durch ansässige Chemieindustrie ■ Zusatznutzen: PR- und Marketingchancen (leise, sauber, innovativ, spannend)
Risiken	■ Fallende Mineralöl- / Gaspreise (z. B. durch Fracking) ■ Berücksichtigung von Wasserstoff im Energiesteuergesetz ■ Flache Lernkurven und lange Entwicklungszeiträume führen zu Frustration unter Projektpartnern und bei Geldgebern ■ Weitere Entwicklungsfortschritte bei Verbrennungsmotoren (Effizienz, Lautstärke, Abgasnachbehandlung) und Batterietechnologie ■ Wettbewerbsdruck durch leitungsgebundenen Verkehr

Quelle: eigene

4.3 FÖRDERMITTEL UND BESCHAFFUNGSINITIATIVEN FÜR BUSSE MIT BRENNSTOFFZELLENGEOTECHNOLOGIE

Im Rahmen verschiedener nationaler und europäischer Förderprogramme stehen Fördermittel für die Anschaffung und den Betrieb von brennstoffzellen-elektrischen Bussen sowie den Aufbau der Wasserstoff-Tankstelle zur Verfügung.

Darüber hinaus stellen in Deutschland die Bundesländer eigene Mittel für beispielsweise Elektromobilität, Klima- und Umweltschutz, Wirtschafts- und Forschungsförderung bereit, die für die Anschaffung und den Betrieb von brennstoffzellenelektrischen Bussen genutzt werden können. Weitere Auskünfte erteilt die H2BZ-Initiative Hessen e.V.

Übersicht laufende hessische, nationale und europäische Förderprogramme für die Demonstration von brennstoffzellenelektrischen Bussen

	Programm	Unterstützer	Koordinator / Bemerkung
Europa	CHIC Clean Hydrogen in European Cities (Laufzeit 2012-2015) www.chic-project.eu	Europäische Kommission	FCH-JU Fuel Cell & Hydrogen Joint Undertaking
	HyER European Association for Hydrogen and Fuel Cells and Electromobility in European Regions. www.hyer.eu	Europäische Kommission	Freiwilliger Zusammenschluss, keine finanzielle Unterstützung
Deutschland	NIP Nationales Innovationsprogramm für Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (Laufzeit 2007-2016) Fördersumme: 1,4 Milliarden Euro www.now-gmbh.de	BMVBS Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung; BMWi Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Industrie	NOW Nationale Organisation für Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
	CEP Clean Energy Partnership (Laufzeit 2002-2016) www.cleanenergypartnership.de	BMVBS	NOW Nationale Organisation für Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie; Teil des NIP
Hessen	Hessen Modellprojekte www.innovationsfoerderung-hessen.de	Zwei Hessische Ministerien: für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung (HMWEVL) und für Wissenschaft und Kunst (HMWK)	HA Hessen Agentur

Zahlreiche hessische Unternehmen und Organisationen stehen Ihnen für Informationen gerne zur Verfügung. Die Kontaktdaten finden Sie im Kompetenzatlas Wasserstoff und Brennstoffzellen Hessen, der

auch online unter www.H2BZ-Hessen.de abgerufen werden kann. Darüber hinaus bieten nachstehende Kontaktadressen weitere Auskünfte rund um die H2BZ-Technologie.

5.1 ADRESSEN UND ANSPRECHPARTNER IN HESSEN

Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie:

H2BZ-Initiative Hessen e.V. HA Hessen Agentur GmbH

Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
Konradinallee 9, 65189 Wiesbaden

Ansprechpartner:

Alina Stahlschmidt / Markus Lämmer / Oliver Eich

T 0611 95017-8959

F 0611 95017-8620

alina.stahlschmidt@hessen-agentur.de

markus.laemmer@hessen-agentur.de

oliver.eich@hessen-agentur.de

www.hessen-agentur.de

Elektromobilität:

Geschäftsstelle Elektromobilität Hessen HA Hessen Agentur GmbH

Konradinallee 9
65189 Wiesbaden

Ansprechpartner:

Jürgen Schilling

T 0611 95017-8362

F 0611 95017-8620

juergen.schilling@hessen-agentur.de

www.strom-bewegt.hessen.de

www.hessen-agentur.de



HessenAgentur

HA Hessen Agentur GmbH

5.2 ORGANISATIONEN UND EINRICHTUNGEN

Folgende Organisationen können weitere Auskünfte über Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien in Bussen erteilen:

Nationale Organisationen:

NOW GmbH

Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
Fasanenstraße 5
10623 Berlin
www.now-gmbh.de

CEP Clean Energy Partnership

c/o be: public relations GmbH
Humboldtstraße 57
22083 Hamburg
www.cleanenergypartnership.de

VDV

Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V.
Geschäftsstelle Frankfurt am Main
Kurt-Schumacher-Straße 8
60311 Frankfurt/Main
www.vdv.de

VDA

Verband der Automobilindustrie e.V.
Behrenstraße 35
10117 Berlin
www.vda.de

VDMA

Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.
Lyoner Straße 18
60528 Frankfurt/Main
www.vdma.org

ZVEI

Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronik-
industrie e.V.
Lyoner Straße 9
60528 Frankfurt am Main
www.zvei.org

Neben den nationalen Organisationen gibt es auf Ebene der Bundesländer sowie in verschiedener Regionen Projektgesellschaften die weitere Auskünfte erteilen können.

5.3 THEMENBEZOGENE PUBLIKATIONEN

Publikation: Kompetenzatlas Wasserstoff und Brennstoffzellen Hessen

Herausgegeben von: Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMULEV), 2010

Broschüre: Wasserstoff und Brennstoffzellen

Herausgegeben von: Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMULEV), 2010

Broschüre: Wasserstoff-Tankstellen

Herausgegeben von: Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMULEV), 2011

Broschüre: Flurförderzeuge mit Brennstoffzellen

Herausgegeben von: Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMULEV), 2011

Broschüre: Wasserstoff und Windenergie

Herausgegeben von: Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMULEV), 2013

Publikation: Handbuch Elektromobilität

(erscheint jährlich)
Herausgegeben von: Dr. Reiner Korthauer,
EW Medien und Kongresse GmbH

Broschüre: Elektromobilität – Deutschland als Leitmarkt und Leitanbieter

Herausgegeben von: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS)

Broschüre: Busse & Bahnen für eine Nachhaltige Mobilität

Herausgegeben von: Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV), 2010

Buch: Nachhaltiger Nahverkehr – Beiträge des ÖPNV zum Umwelt- und zum Klimaschutz

Herausgeber: Verband Deutscher Verkehrsunternehmen /VDV-Förderkreis, 2010

Publikation: Roadmap elektromobile Stadt

(Meilensteine auf dem Weg zur nachhaltigen urbanen Mobilität)

Herausgegeben von: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS)

Publikation: Ein Portfolio von Antriebssystemen

für Europa: Eine faktenbasierte Analyse – Die Rolle von batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen, Plug-in Hybridfahrzeugen und Brennstoffzellenfahrzeugen
Herausgegeben von: McKinsey & Company

Buch: Energiewende 3.0 – Mit Wasserstoff und Brennstoffzellen

Herausgegeben von: Hydrogeit Verlag, 2012

Hessen ist Deutschlands führender Finanz- und Bankenstandort. Die Europäische Zentralbank und die Deutsche Bundesbank haben ihren Sitz in Frankfurt ebenso wie wichtige Industrieverbände der Branchen Chemie, Elektrotechnik sowie des Maschinen- und Anlagenbaus. Die Logistik zählt zu den Zukunftsbranchen des Landes. Im geografischen und verkehrstechnischen Herzen Europas haben zahlreiche ausländische Unternehmen ihre Niederlassung, der Frankfurter Flughafen ist eine der wichtigsten internationalen Drehscheiben im Flugverkehr.

Die Mobilität spielt in Hessen seit jeher eine wichtige Rolle und ist auch für die Zukunft ein herausragendes Thema in allen wirtschaftlichen und politischen Bereichen. Denn für ein Transitland wie Hessen im Herzen Deutschlands und Europas sind Mobilität und Logistik nicht nur nachhaltige Wirtschaftsfaktoren, sondern Synonyme für eine moderne und fortschrittliche Gesellschaft. Die steigenden Warenflüsse und die zunehmende Verkehrsdichte erfordern Innovationen und Investitionen in die Entwicklung zukunftsfähiger Energie- und Mobilitätstechnologien.

Neben der Mobilität kommen den Themen Energie und Energieversorgung in der hessischen Landesregierung eine wichtige Rolle zu. Hessen ist bestrebt, den landesweiten Energiebedarf zu senken und die Energieeffizienz zu erhöhen sowie den Anteil der erneuerbaren Energien bis zum Jahre 2020 auf 20 Prozent auszubauen.

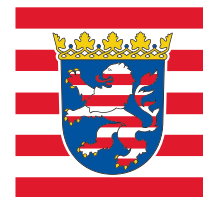
Unter den Hightech-Regionen in Europa gehört Hessen zur Spitze. Die hessische Landesregierung fördert den Technologietransfer zwischen Hochschulen und Wirtschaft und konzentriert sich innerhalb der Technologieförderung auf Zukunftstechnologiefelder wie beispielsweise die Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (H2BZ).

Das Land Hessen unterstützt seit vielen Jahren die Entwicklungen und Aktivitäten im Bereich der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie und Elektromobilität. Im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung ist die landeseigene Wirtschaftsförderungsgesellschaft HA Hessen Agentur GmbH Projektträger der Fördermaßnahmen. Darüber hinaus haben sich Vertreter aus der hessischen Industrie, der Wissenschaft und Gesellschaft in der H2BZ-Initiative zusammengeschlossen, um die Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie in Hessen voranzubringen und den Wirtschafts- und Wissenschaftsstandort Hessen zu stärken.





HESSEN



7.1 HÄUFIG GESTELLTE FRAGEN

1 WAS BEINHALTET DIE ELEKTRO-MOBILITÄT?

Elektromobilität ist mehr als der Einsatz von Elektrofahrzeugen mit Batterie und Brennstoffzelle. Dazu gehört die Strom-Lade- und Wasserstoff-Infrastruktur, der Umwelt- und Klimaschutz mit dem Ausbau der Erneuerbaren Energien sowie die Schaffung verbindlicher, gesetzlicher Rahmenbedingungen. Auch die Vernetzung und Steuerung von Verkehrsträgern, die Finanzierbarkeit von elektromobilen Systemen sowie die Einflussfaktoren von gesellschaftlichen Entwicklungen spielen eine Rolle bei der Einführung der Elektromobilität. Des Weiteren bezieht sich die Elektromobilität nicht nur auf den Straßenverkehr (mit den Transportmitteln Zweiräder, PKW, Nutzfahrzeuge und Busse), sondern grundsätzlich auf alle Verkehrswege (Schiene, Wasser, Luft) und deren -träger. (siehe Kapitel 2)

2 WELCHEN EINFLUSS HAT DIE ELEKTRO-MOBILITÄT AUF DEN VERKEHR?

Die Elektromobilität bietet das große Potenzial, den Verkehr umweltfreundlicher zu gestalten, weil weniger Ressourcen verbraucht und erneuerbare Energien eingesetzt werden können. (siehe Kapitel 2)

3 WAS UNTERSCHIEDET ELEKTRO- VON VERBRENNUNGSMOTOREN?

Der Elektroantrieb hat insgesamt einen höheren Wirkungsgrad als der Verbrennungsmotor. Das heißt, ein größerer Anteil der eingesetzten Energie kann zum Fahren genutzt werden. Darüber hinaus stoßen Elektrobusse mit Brennstoffzellen beim Fahren keine schädlichen Emissionen aus. Wird der dazu benötigte Wasserstoff gänzlich aus erneuerbaren Energien erzeugt, handelt es sich sogar um sogenannte Null-Emissions-Fahrzeuge. (siehe Kapitel 3.1)

4 WELCHE VORTEILE ERGEBEN SICH DURCH DIE HYBRIDISIERUNG?

Sowohl Elektro- als auch Verbrennungsmotoren haben spezifische Eigenschaften, die sich – bei Bedarf – ergänzen können. Der klassische Fahrzeughybrid kombiniert einen Verbrennungsmotor und einen mitgeführten Treibstoff mit einem Elektromotor und einem Batteriespeicher. Der Hybridantrieb wird so gesteuert, dass beide Motoren jeweils dann zum Einsatz kommen, wenn sie ihren optimalen Wirkungsgrad erreichen (beim Verbrennungsmotor im konstanten Betrieb beispielsweise bei Überland- oder Autobahnfahrten, beim Elektromotor insbesondere im Stadtverkehr mit häufigen Stopps und Beschleunigungsvorgängen). (siehe Kapitel 3.1)

5 WIE UNTERSCHIEDEN SICH BATTERIE-ELEKTRISCHE VON BRENNSTOFF-ZELLEN-ELEKTRISCHEN ANTRIEBEN?

Beides sind rein elektrische Antriebe und fahren völlig emissionsfrei und leise. Bei batterieelektrischen Antrieben kommt der Strom für den Elektromotor vom Batteriespeicher, der an der Steckdose und durch Rekuperation geladen wird. Beim brennstoffzellenelektrischen Antrieb wird der Strom an Bord in einer Brennstoffzelle aus Wasserstoff und Luft erzeugt. Der Wasserstoff wird in einem Tank mitgeführt und kann durch Tanken wiederbefüllt werden. (siehe Kapitel 3.1)

6 WELCHE VORTEILE BIETEN BRENNSTOFFZELLEN-SYSTEME IN NAHVERKEHRSBUSSEN?

Brennstoffzellensysteme sind hocheffiziente Energiewandler und verursachen durch den Betrieb mit Wasserstoff keinerlei Emissionen. Der Vorteil des elektrischen Antriebs kommt im Nutzungsprofil des Stadtverkehrs optimal zum Einsatz: Häufiges Anhalten, Wiederauffahren und Beschleunigen kann durch den Elektromotor und die Dynamik des Brennstoffzellensystems bei Lastanforderungen optimal bedient werden.

7 WO WERDEN BRENNSTOFFZELLEN-ELEKTRISCHE BUSSE MIT WASSERSTOFF BETANKT?

Die Busse werden an Wasserstoff-Tankstellen betankt. Idealerweise installiert das Nahverkehrsunternehmen eine eigene Tankstelle auf einem Betriebshof, wie es heute bei Dieselnissen ebenfalls üblich ist. Dort können die Busse nach Betriebsschluss betankt werden. Eine Tankfüllung reicht aus, um die tägliche Strecke im Linienbetrieb zurückzulegen. (siehe Kapitel 3.3)

8 WARUM SIND BUSSE MIT BRENNSTOFFZELLEN-SYSTEMEN TEURER ALS DIESELBUSSE?

Wesentliche Komponenten der E-Busse werden im Vergleich mit konventionellen Fahrzeugen noch nicht in Massenfertigung hergestellt. Davon betroffen sind sowohl die Batterie als auch die Brennstoffzelle. Allerdings haben alle Hersteller dieser Komponenten eine deutliche Kostenreduzierung angekündigt, sobald Serienprozesse etabliert sind. In Zukunft werden Elektrofahrzeuge wettbewerbsfähig mit etablierten Fahrzeugtechnologien sein. Ein gegebenenfalls höherer Anschaffungspreis rechtfertigt sich durch einen wesentlich niedrigeren Energieverbrauch über die Lebensdauer des Fahrzeugs. (siehe Kapitel 4.1)

9 WARUM LOHNT SICH DER EINSATZ VON BRENNSTOFFZELLEN-ELEKTRISCHEN BUSSEN FÜR DEN BETREIBER?

Der Einsatz von brennstoffzellenelektrischen Bussen ist ohne Förderung heute zwar noch nicht wirtschaftlich darstellbar, dafür ist die Beschaffung der innovativen Technologie eine zukunftsgerichtete Entscheidung. Busse sind mindestens 12 Jahre im Einsatz und zum Zeitpunkt der Beschaffung müssen bereits zukünftige Umwelt- und Klimaziele und die damit verbundenen Emissionsrichtlinien berücksichtigt werden. Brennstoffzellenelektrische Busse sind Null-Emissions-Fahrzeuge und können damit aus heutiger Sicht zukünftige Anforderungen erfüllen (siehe Kapitel 4.2). Zudem ist davon auszugehen, dass die Preise für fossile Energieträger tendenziell steigen.

10 WIE LÄSST SICH DIE WIRTSCHAFTLICHKEIT VON BRENNSTOFFZELLEN-ELEKTRISCHEN BUSSEN WEITER VERBESSERN?

Die Wirtschaftlichkeit lässt sich durch günstigere Beschaffungspreise, niedrigere TCO und durch Kostenteilung verbessern. Höhere Stückzahlen können durch eine gemeinsame Beschaffungspolitik der Länder oder der Nahverkehrsbetreiber erreicht werden. Beim Aufbau der Wasserstoff-Infrastruktur können weitere Allianzen geschmiedet und so die Kosten des Aufbaus und Betriebs auf verschiedene Akteure verteilt werden. Neue Wege der Kooperation, unterstützt durch Förderprogramme der Politik, bieten weitere Verbesserungsmöglichkeiten.

7.2 DATENBLÄTTER UND UMRECHNUNGSTABELLEN

EINE ÜBERSICHT DER WICHTIGSTEN DATEN UND FAKTEN ÜBER WASSERSTOFF UND ANDERER KRAFTSTOFFE SOWIE UMRECHNUNGSTABELLEN ENERGIE UND LEISTUNG

					Wasserstoff			Diesel		Steinkohle	Methan (Erdgas)		Rohöl	
	J	kWh	cal	BTU	kg	Nm ³	l LH ₂	kg	l	kg	kg	Nm ³	kg	Barrel
	1	2,778(-7)	0,2388	9,478(-4)	8,335(-9)	9,274(-8)	1,177(-7)	2,328(-8)	2,799(-8)	3,412(-8)	1,802(-8)	2,511(-8)	2,388(-8)	1,751(-10)
	kWh	3,6(6)	1	8,598(5)	3,001(-2)	0,3339	0,4239	8,380(-2)	0,1008	0,1228	6,487(-2)	9,041(-2)	8,598(-2)	6,304(-4)
	cal	4,187	1,163(-6)	1	3,968(-3)	3,490(-8)	3,883(-7)	4,930(-7)	9,746(-8)	1,172(-7)	1,429(-7)	7,544(-8)	1,051(-7)	1(-7)
	BTU	1055	2,931(-4)	252	1	8,795(-6)	9,785(-5)	1,242(-4)	2,953(-5)	3,600(-5)	1,901(-5)	2,650(-5)	2,520(-5)	1,848(-7)
Wasserstoff	kg	1,200(8)	33,33	2,865(7)	1,137(5)	1	11,13	14,13	2,793	3,358	4,094	2,162	3,013	2,865
	Nm ³	1,078(7)	2,995	2,575(6)	1,022(4)	8,988(-2)	1	1,27	0,251	0,3018	0,3679	0,1943	0,2708	0,2575
	l LH ₂	8,493(6)	2,359	2,028(6)	8049	7,079(-2)	0,7876	1	0,1977	0,2377	0,2898	0,153	0,2133	0,2028
Diesel	kg	4,296(7)	11,93	1,026(7)	4,072(4)	0,3581	3,984	5,058	1	1,202	1,466	0,7741	1,079	1,026
	l	3,573(7)	9,925	8,534(6)	3,386(4)	0,2978	3,314	4,207	0,8317	1	1,219	0,6438	0,8973	0,8534
Steinkohle	kg	2,931(7)	8,141	7(6)	2,778(4)	0,2443	2,718	3,451	0,6822	0,8203	1	0,5281	0,736	0,7
Methan (Erdgas)	kg	5,550(7)	15,42	1,326(7)	5,260(4)	0,4626	5,147	6,535	1,292	1,553	1,894	1	1,394	1,326
	Nm ³	3,982(7)	11,06	9,511(6)	3,774(4)	0,3319	3,693	4,689	0,9269	1,114	1,359	0,7175	1	0,9511
Rohöl	kg	4,187(7)	11,63	1(7)	3,968(4)	0,349	3,883	4,93	0,9746	1,172	1,429	0,7544	1,051	1
	Barrel	5,711(9)	1,586(3)	1,364(9)	5,413(6)	47,6	529,6	672,4	132,9	159,8	194,9	102,9	143,4	136,4

Energietabelle für die Umrechnung verschiedener Energieeinheiten und -äquivalente

Anmerkung: x(y) bedeutet x·10^y

Quelle: Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband e.V. (DWV), Berlin

	Pa	bar	atm	Torr	at	m WS	psi
				(mm Hg)	(kp/cm ²)		(lb/in ²)
Pa	1	1(-5)	9,86923(-6)	7,50062(-3)	1,01972(-5)	1,01972(-4)	1,45038(-4)
bar	1(5)	1	0,986923	750,062	1,01972	10,1972	14,5038
atm	1,01325(5)	1,01325	1	760	1,03323	10,3323	14,6959
Torr	133,322	1,33322(-3)	1,31579(-3)	1	1,35951(-3)	1,35951(-2)	1,93368(-2)
at	98066,5	0,980665	0,967841	735,559	1	10	14,2233
m WS	9806,65	9,81E-02	9,68E-02	73,5559	0,1	1	1,42233
psi	6894,76	6,89476(-2)	6,80460(-2)	51,7149	7,03070(-2)	0,70307	1

Drucktabelle für die Umrechnung verschiedener Druckeinheiten

Anmerkung: x(y) bedeutet x·10^y

Quelle: Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband e.V. (DWV), Berlin

		Helium	Wasserstoff	Stickstoff	Methan	Propan	Methanol	n-Heptan	Wasser	n-Dekan
		4He	H ₂	N ₂	CH ₄	C ₃ H ₈	CH ₃ OH	C ₇ H ₁₆	H ₂ O	C ₁₀ H ₂₂
Molmasse	g/mol	4,003	2,016	28,013	16,043	44,097	32,042	100,204	18,015	142,285
Heizwert	kJ/g	0	120	0	50	46,4	19,7	44,7	0	44,6
Tripelpunkt Wasserstoff-Werte gelten für p-H ₂										
Temperatur	K	-	13,8	63,1	90,7	85,5	175,5	182,6	273,2	243,5
Druck	mbar	-	70,4	125,3	117,2	0	0	0	6,1	0
Flüssigkeitsdichte	g/l	-	77	867,8	451,2	732,9	894,4	771,6	999,8	765,6
Gasdichte	g/l	-	0,125	0,675	0,251	0	0	0	0,005	0
Siedepunkt (p = 1 atm) Wasserstoff-Werte gelten für p-H ₂										
Temperatur	K	4,2	20,3	77,3	111,6	231,1	337,9	371,6	373,2	447,3
Flüssigkeitsdichte	g/l	125	70,8	808,6	422,5	580,7	749,6	614,6	958,1	603
Gasdichte	g/l	16,89	1,338	4,59	1,82	2,42	1,2	3,47	0,6	4,13
Viskosität Flüssigkeit	µPas	2,72	11,9	13,98	19,3	?	?	?	?	?
Verdampfungswärme	J/g	20,6	445,5	198,6	510,4	427,8	1100	317,7	2265,9	278,4
Verdampfungswärme	kJ/l	2,6	31,5	160,6	215,7	248,4	824,6	195,3	2171	167,9
Heizwert Flüssigkeit	MJ/l	0	8,5	0	21,1	26,9	14,8	27,5	0	26,9
Heizwert Gas	kJ/l	0	160,5	0	90,9	112,1	23,6	155,1	0	184,2
Kritischer Punkt										
Temperatur	K	5,2	33	126,2	190,6	369,8	512,6	540,2	647,3	617,7
Druck	bar	2,3	12,9	34	46	42,4	81	27,4	220,6	21,1
Dichte	g/l	69,6	31,4	314	162,2	218,7	271,5	234,1	322	237,1
Normalzustand (0 °C, 1 atm) kursive Werte gelten beim Dampfdruck										
Flüssigkeitsdichte	g/l	-	-	-	-	528,3	812,9	702,3	-	744,7
Gasdichte	g/l	0,178	0,09	1,25	0,718	2,011	1,44	4,48	0,005	6,35
Dampfdruck	mbar	-	-	-	-	4763	39,5	15,3	6,1	26
Gasviskosität	µPa s	19,7	8,9	17,7	10,9	8,3	-	-	-	-
Vol.-verh. Gas Norm./Flkt. Siedep.		700	788	647	589	289	-	-	-	-
Heizwert Flüssigkeit	MJ/l	-	-	-	-	24,5	16	31,4	-	33,2
Heizwert Gas	kJ/l	0	10,8	0	35,9	93,2	28,4	200,3	0	283,2
Gemisch mit Luft										
Untere Explosionsgrenze	Vol-%	-	4	-	4,4	1,7	6	1,1	-	0,7
Untere Detonationsgrenze	Vol-%	-	18,3	-	6,3	2,2	?	?	?	?
stöchiometrisches Gemisch	Vol-%	-	29,6	-	9,5	4	12,3	1,9	-	1,3
Obere Detonationsgrenze	Vol-%	-	59	-	13,5	9,2	?	?	?	?
Obere Explosionsgrenze	Vol-%	-	77	-	17	10,9	50	6,7	-	5,4
Mindestzündenergie	mJ	-	0,017	-	0,29	0,24	0,14	0,24	-	?
Selbstentzündungstemperatur	K	-	833	-	868	743	728	488	-	478

Vergleichstabelle für physikalische und chemische Eigenschaften von Wasserstoff und anderen Stoffen (Gasen, Energieträgern). Bemerkung: Heptan und Dekan sind als Stoffe ausgewählt worden, die dem Benzin bzw. Heizöl in ihren Eigenschaften ähnlich sind.

Quelle: Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband e.V. (DWV), Berlin

IMPRESSUM

Band 4

der Schriftenreihe Wasserstoff und Brennstoffzellen

Brennstoffzellen im öffentlichen Personennahverkehr

Autoren

Alexandra Huss
(AKOMBE Markt- und Technologiekommunikation, Köln)
www.akombe.de

Marcel Corneille
(EMCEL GmbH, Köln)
www.emcel.com

Redaktion

Alina Stahlschmidt, Buket-Deniz Ulusoy, Alexander Bracht
(HA Hessen Agentur GmbH)

Die Mitglieder des Vorstandes der
H2BZ-Initiative Hessen e.V., insbesondere:
Jürgen Schmidt (ÜWG)

Herausgeber

HA Hessen Agentur GmbH
Konradinallee 9
65189 Wiesbaden
Telefon 0611 95017-8959
E-Mail info@H2BZ-Hessen.de
www.Hessen-Agentur.de
www.H2BZ-Hessen.de

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und die Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die in der Veröffentlichung geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit der Meinung des Herausgebers übereinstimmen.

© Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie,
Verkehr und Landesentwicklung (HMWEVL)

Kaiser-Friedrich-Ring 75
65185 Wiesbaden
www.wirtschaft.hessen.de

Vervielfältigung und Nachdruck – auch auszugsweise –
nur nach vorheriger schriftlicher Genehmigung.

Gestaltung: Theißen-Design, www.theissen-design.de

Endlektorat: Uta Marini, Kassel

Titelfoto: Quelle Regionalverkehr Köln GmbH, Abdruck honorarfrei.
„Einer von vier Brennstoffzellen-Hybridbussen der RVK vom
Typ A330 FC von Van Hool.“

Druck: A&M Service GmbH, Elz
Klimaneutraler Druck

ClimatePartner[®]

Juli 2015, 1. Auflage



HESSEN



Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie,
Verkehr und Landesentwicklung

Kaiser-Friedrich-Ring 75
65185 Wiesbaden

www.wirtschaft.hessen.de



HessenAgentur

HA Hessen Agentur GmbH

www.Hessen-Agentur.de



Initiative
Hessen

www.H2BZ-Hessen.de