

INNOVATIVE ANTRIEBE MIT BRENNSTOFFZELLE – POTENZIAL UND BEISPIELE

Alexander TRATTNER¹, Frank MAIR¹, Patrick PERTL¹, Manfred KLELL^{1,2}

¹ HyCentA Research GmbH, Inffeldgasse 15, A-8010 Graz, +43 316 873 9501,
office@hycenta.at, www.hycenta.at

² TU Graz, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, Inffeldgasse 19,
A-8010 Graz, klell@ivt.tugraz.at

Kurzfassung: Um die 2015 in Paris beschlossenen Klimaziele zu erreichen, ist die Dekarbonisierung unseres Energiesystems erforderlich. Speziell im Verkehrssektor ist die derzeit zu über 90 % fossil basierte Mobilität vollständig auf Elektromobilität mit Brennstoffzelle und Batterie umzustellen. Für kurze Strecken bei niedrigen Lasten bietet sich dabei die Batterie-Elektromobilität mit Battery Electric Vehicles (BEVs) an. Diese bieten höchste Wirkungsgrade, erfordern aber lange Ladezeiten. Die Aufladung der Batterien erfolgt derzeit mit maximal 145 kW (Tesla Supercharger), bei zunehmender Fahrzeugzahl stellen die bereitzustellende Energie und Leistung noch nicht gelöste Anforderungen an die Stromnetze. Innovative Antriebe mit Brennstoffzelle kompensieren die konzeptbedingten Nachteile der rein batterieelektrischen Antriebe und sind vor allem bei geforderten hohen Reichweiten und Zuladungen das bevorzugte Konzept.

In der Mobilität werden aufgrund ihres guten dynamischen Verhaltens und der geringen Kosten in Serienproduktion überwiegend Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen verwendet, die hochreinen Wasserstoff benötigen. Beispielhaft werden serienreife Fahrzeuge und Projekte mit Anwendungen von Brennstoffzellen in PKW, LKW und Bus vorgestellt. Trotz der Serienreifen bestehen weitere große Entwicklungspotenziale, die in österreichischen und internationalen Forschungsprojekten untersucht und umgesetzt werden. Auch Sonderanwendungen, wie zum Beispiel Züge und Pistengeräte werden betrachtet. Des Weiteren werden Lebenszyklus- und Kostenanalysen von Brennstoffzellenantrieben im Vergleich zu verbrennungskraftmotorischen und rein batterieelektrischen Antrieben dargestellt. Die Lebenszyklusanalyse berücksichtigt dabei die Umweltwirkung (CO₂-Emissionen) von Produktion, Nutzung und Entsorgung. Der Einfluss von Heizung bzw. Kühlung der Fahrgastzelle auf die Gesamteffizienz wird in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen sowohl für FCEVs (Fuel Cell Electric Vehicles) als auch für BEVs untersucht.

Keywords: Innovative Antriebe, Brennstoffzelle, Wasserstoff, Energieeffizienz

1 Einleitung

Grüner Strom und grüner Wasserstoff aus Power-to-Gas Anlagen sind die einzigen emissionsfreien Energieträger für die Energiewende. Sie erlauben nicht nur einen emissionsfreien Energiekreislauf, sondern bieten auch einen deutlich höheren Wirkungsgrad und damit geringeren Energiebedarf. Wasserstoff ist der Schlüssel für den Ausbau der erneuerbaren Stromproduktion aus Wind, Wasser und Sonne, da Energieüberschüsse genutzt und eine langfristige sowie effiziente Energiespeicherung kostengünstig ermöglicht

werden. Wasserstoff ermöglicht eine Verschränkung der verschiedenen Energie- und Nutzungssektoren (Haushalt, Industrie und Mobilität) und bietet damit gleichzeitig die nötige Flexibilität und Netzstabilisierung für Energiesysteme mit hohen erneuerbaren Anteilen. Durch die essentielle Bedeutung des Wasserstoffs für das erneuerbare Energiesystem wird dieser kostengünstig und in großen Mengen für die Mobilität verfügbar sein.

Im Verkehrssektor allgemein und im Speziellen beim Schwerverkehr (Busse, Lieferfahrzeuge, LKW etc.), auf den aktuell der Großteil der Treibhausgasemissionen entfällt, besteht Handlungsbedarf um die derzeit zu über 90 % fossil basierte Mobilität vollständig auf Elektromobilität mit Brennstoffzelle und Batterie umzustellen. Für kurze Strecken bei niedrigen Lasten bietet sich dabei die Batterie-Elektromobilität mit BEVs an. Diese bieten zwar höchste Wirkungsgrade, erfordern aber lange Ladezeiten. Die Aufladung der Batterien erfolgt derzeit mit maximal 145 kW, bei zunehmender Fahrzeugzahl stellen die bereitzustellende Energie und Leistung noch nicht gelöste Anforderungen an die Stromnetze. Außerdem begrenzen die Aufladezyklen die Lebensdauer der Batterien und das Aufladeverhalten sowie Reichweite der Batterien verschlechtern sich bei tiefen Temperaturen.

Durch die Trennung von Energiespeicher, meist der Wasserstofftank, und Energiewandler, die Brennstoffzelle, sind gegenüber Batterien deutlich höhere Energiedichten und damit hohe Reichweiten bei kurzer Betankungsdauer (circa 3 min) realisierbar. Für große Leistungen und Reichweiten, gewissermaßen die Elektromobilität im Schwerverkehr, bietet die Brennstoffzellen-Elektromobilität mit FCEVs das Antriebskonzept der Wahl. Wasserstoff-Brennstoffzellen-Fahrzeuge stellen lokal treibhausgas- und schadstoffemissionsfreie (in Folge als emissionsfrei bezeichnet) Elektrofahrzeuge dar. Besonders Elektrofahrzeugen mit PEM (Polymer-Elektrolyt-Membran) Brennstoffzellen in Kombination mit grünem Wasserstoff kommt eine essentielle Bedeutung zu, da diese die geringsten Treibhausgas-Emissionen (THG) aller Fahrzeugkonzepte über den gesamten Lebenszyklus (Produktion, Betrieb, Recycling) aufweisen; siehe THG Emissionen PKW in Abbildung 1. Zusätzlich weisen Elektrofahrzeuge mit PEM Brennstoffzellen in Großserie geringere Kosten als reine batterieelektrische Fahrzeuge bei gleichen Stückzahlen und hohen Reichweiten auf. Dennoch benötigt jedes Brennstoffzellen-Fahrzeug auch eine Batterie für die Rekuperation der Bremsenergie und ist somit ein Elektro-Hybrid-Fahrzeug, so dass Batterie und Brennstoffzelle synergetisch zusammenarbeiten und keinen Widerspruch darstellen.

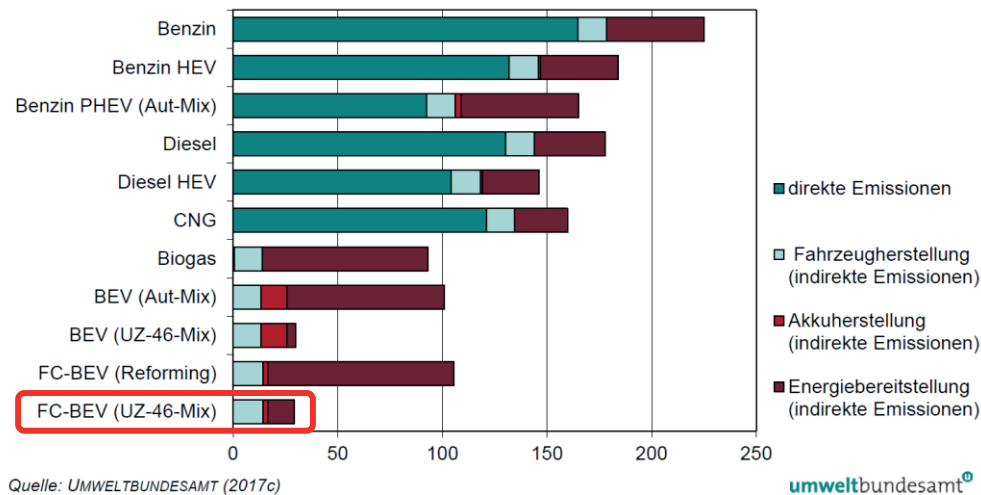


Abbildung 1: THG-Emissionen in Gramm pro Fahrzeugkilometer [7]

2 Zero Emission Fahrzeuge

Gegenwärtig weisen batterieelektrische Fahrzeuge (BEV – Battery Electric Vehicle) einen hohen Wirkungsgrad und niedrige Betriebskosten auf, aber die begrenzte Reichweite (insbesondere bei kalten Bedingungen) und die lange Ladedauer sind entscheidende Nachteile. Eine grundlegende Ladeinfrastruktur für BEVs existiert und die Aufrüstung auf höhere Ladeleistungen ist gerade im Gange. Dennoch wird eine weit verbreitete Installation von Schnellladestationen mit Leistungen von 145 kW und mehr durch die hohen Kosten für den Netzanschluss und die verfügbare sowie übertragbare Menge an elektrischer Energie begrenzt. Darüber hinaus verkürzt Laden mit hoher Leistung die Lebensdauer von Batterien.

Mit Wasserstoff betriebene Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge bieten erhebliche Vorteile. Wasserstoff ist ein unbegrenzt verfügbarer, sicherer und effizienter Energieträger, der aus verschiedenen erneuerbaren Quellen herstellbar ist und die erforderliche Flexibilität für die zukünftige Mobilität bestens erfüllt. Grundsätzlich bieten FCEVs ähnliche Reichweiten und Betankungsdauern wie herkömmliche VKM-Fahrzeuge (Verbrennungskraftmaschine). Die Betankung von 5 kg Wasserstoff in 3 Minuten entspricht einer Betankungsleistung von circa 3,4 MW. Aufgrund der signifikant höheren Energiedichte von Wasserstoff im Vergleich zu Batterien [2,15] ist der Einfluss der zu speichernden Energie auf die FCEV-Antriebsstrangkosten und das Gewicht gering. Daher stellt Wasserstoff eine geeignete Energiequelle dar, wenn eine hohe Leistung und ein großer Energiespeicher benötigt werden, siehe Abbildung 2.

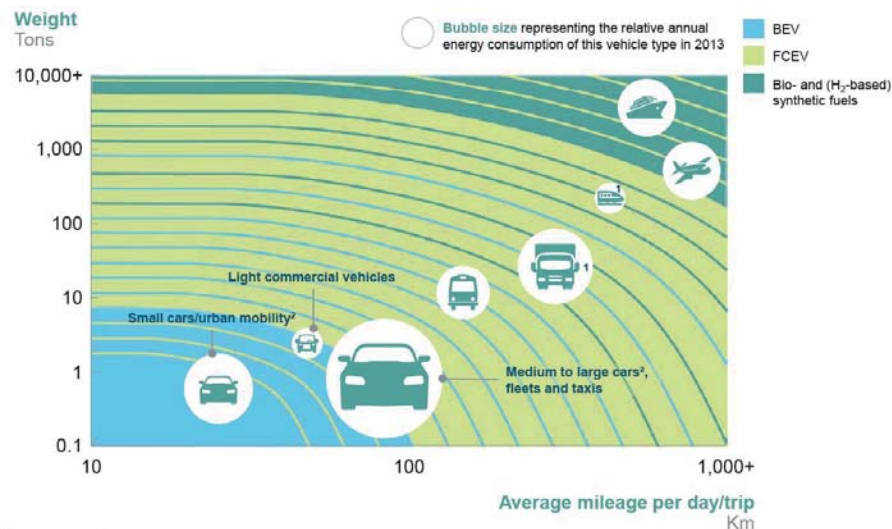


Abbildung 2: Rolle von FCEVs im dekarbonisierten Transportsystem [2]

BEVs und mit Wasserstoff betriebene FCEVs sind emissionsfreie Fahrzeuge von Tank-to-Wheel (TtW). Bei einer Well-to-Tank (WtT) Betrachtung können jedoch in Abhängigkeit der Art der Strom- bzw. Wasserstoffproduktion und dem Lade- bzw. Tankstellenkonzept erhebliche Emissionen vor der eigentlichen Fahrzeugnutzung auftreten [19]. Eine Steigerung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen sowie die erneuerbare Wasserstoffproduktion durch Elektrolyse ist die Voraussetzung für geringe Well-to-Wheel (WtW) Emissionen von BEVs und FCEVs. Die Analysen der CO₂-Emissionen in Abbildung 3 basieren auf veröffentlichten WtT-Daten [4] und üblichen Verbrauchswerten von C-Klasse-Fahrzeugen:

- ICE – 5,4 l/100km Kraftstoffverbrauch, Diesel – 54 g_{CO2}/kWh WtT-Emissionen
- FCEV - 0,76 kg_{H2}/100 km, SMR (Steam Methane Reforming) – 9,5 kg_{CO2}/kg_{H2} WtT-Emissionen, Elektrolyse mit Ökostrom – 40 g_{CO2}/kWh WtT-Emissionen
- BEV – 20 kWh/100 km, Ökostrom – 40 g_{CO2}/kWh WtT-Emissionen

FCEVs, die mit grünem Wasserstoff betrieben werden erreichen sehr niedrige WtW-Emissionen. Sogar die Verwendung von Wasserstoff der durch SMR erzeugt wird, führt zu niedrigeren WtW-Emissionen von FCEVs im Vergleich zu herkömmlichen Dieselfahrzeugen. BEVs, die mit Ökostrom betrieben werden erreichen die geringsten WtW CO₂-Emissionen.

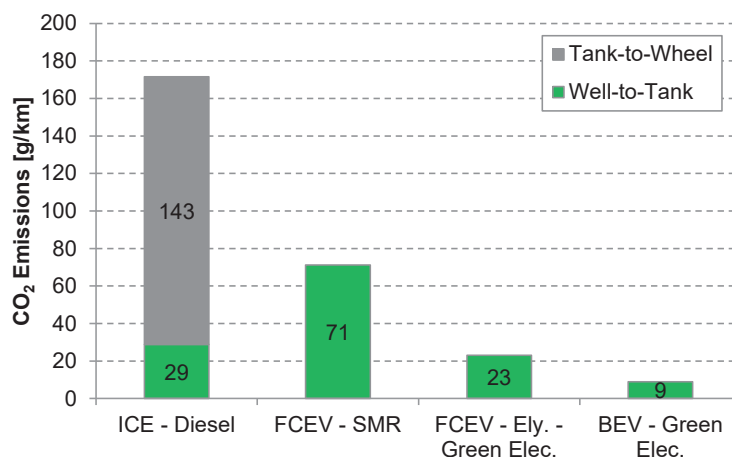


Abbildung 3: CO₂ Emissionen verschiedener Antriebssysteme

3 Kostenvergleich FCEV und BEV

Die gegenwärtigen hohen Kosten von FCEVs bei geringem Produktionsvolumen stellen das Haupthindernis für die weitverbreitete Einführung dar. Bei hohem Produktionsvolumen und hoher geforderter Reichweite erzielt die Brennstoffzelle im Vergleich zur Batterie geringere Kosten, siehe Tabelle 1. Dies wurde auf Basis der veröffentlichten Kosten für hohe Produktionsvolumina von 500.000 Stk./a [3,8] berechnet: Batteriekosten von 112,5 €/kWh, Brennstoffzellenkosten von 40 €/kW und Wasserstoffspeicherkosten von 300 €/kgH₂. Eckdaten des betrachteten Fahrzeugs sind: Energieverbrauch des Fahrzeugs von 15 kWh/100 km, Energieausnutzung der Batterie von 80 %, TtW-Wirkungsgrad von BEV von 84 % und Wasserstoffverbrauch von FCEV von 0,85 kg/100 km.

Tabelle 1: Kostenvergleich von Brennstoffzelle und Batterie bei hohem Produktionsvolumen

	Reichweite in km	100	200	300	400	500	600
FCEV	PEMFC - 100 kW	€ 4,000	€ 4,000	€ 4,000	€ 4,000	€ 4,000	€ 4,000
	Batterie 2 kWh	€ 225	€ 225	€ 225	€ 225	€ 225	€ 225
	Wasserstoffspeichersystem	€ 255	€ 510	€ 765	€ 1,020	€ 1,275	€ 1,530
BEV	Energie net in kWh	15	30	45	60	75	90
	Nennkapazität in kWh	22	45	67	90	112	134
	Kosten bei € 112,5 per kWh	€ 2,517	€ 5,035	€ 7,552	€ 10,070	€ 12,587	€ 15,105
Fahrzeug	FCEV	€ 4,480	€ 4,735	€ 4,990	€ 5,245	€ 5,500	€ 5,755
	BEV	€ 2,517	€ 5,035	€ 7,552	€ 10,070	€ 12,587	€ 15,105

4 Brennstoffzellen Anwendungen

In den letzten Jahren konnten deutliche Fortschritte erreicht werden und die Brennstoffzelle wird mittlerweile für zahlreiche Anwendungen zu Luft, Wasser und Lande entwickelt. In einigen Anwendungsfeldern hat die Industrialisierung begonnen, das Wachstum des Brennstoffzellenmarktes beschleunigt sich zunehmend und die Ausweitung auf weitere Anwendungen ist im Gange. Im Folgenden werden laufende Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsprojekte in Österreich sowie der Technologiestand von FCEVs vorgestellt.

4.1 PKW

Seit 2014 haben mehrere asiatische Automobilhersteller Kleinserien-FCEVs eingeführt (Hyundai ix35 in Abbildung 4, Toyota Mirai in Abbildung 5, Honda Clarity in Abbildung 6), wodurch die technologische Machbarkeit und die herausragenden Vorteile für die Kunden demonstriert werden. Diese FCEVs zeichnen sich durch hohe Wirkungsgrade sowie geringen Wasserstoffverbrauch (<1 kg/100 km), geringe Geräuscentwicklung, ausgezeichnete Fahreigenschaften, hohe Reichweite und kurze Betankungsdauer (max. 3 min) aus. Alle diese aktuellen Serien-FCEVs sind Hybride bestehend aus einer leistungsstarken Brennstoffzelle mit einer Spitzenleistung von ca. 100 kW und einer kleinen Batterie (NiMH oder Li-Ion) mit 1-2 kWh Kapazität und bis zu 20 kW Leistung. Diese Konfiguration erhöht die Effizienz, ermöglicht regeneratives Bremsen und verbessert die Fahrdynamik. Mercedes bringt 2018 eine Kleinserie des GLC F-Cell auf den Markt, siehe Abbildung 7. Der GLC F-Cell ist ein Plug-in-Hybrid mit einem 4,4 kg fassenden Wasserstoffspeicher und einer kombinierten Reichweite von ca. 500 km im NEFZ. Das

Fahrzeug hat eine maximale Leistung des E-Motors von 147 kW und ist mit einer 13,8 kWh Batterie (Li-Ion) ausgestattet.



Abbildung 4: Hyundai ix35 FCEV [13]



Abbildung 5: Toyota Mirai [20]



Abbildung 6: Honda Clarity [10]



Abbildung 7: Mercedes GLC F-Cell [16]

Das transnationale Projekt KEYTECH4EV, ein Konsortium unter der Leitung von AVL, verfolgt einen innovativen Hybridisierungsansatz und entwickelt derzeit ein Demonstrations-Brennstoffzellenauto. Das Projekt besteht aus einem Industriepartner (AVL List GmbH), Komponenten- und Subsystem-Herstellern (ElringKlinger AG, Hörbiger Ventilwerke GmbH, Magna Steyr AG), Forschungsinstituten (Technische Universität Graz, HyCentA Research GmbH, Technische Universität Wien) und der Forschungseinrichtung IESTA. Das Projekt KEYTECH4EV entwickelt Schlüsseltechnologien für die Integration und den Aufbau eines hybridisierten Demonstrationsfahrzeugs mit einem kostenoptimierten und CO₂-freien Antrieb basierend auf Brennstoffzellen- und Batterietechnologie. Diese umfassen Brennstoffzellen-stack, Brennstoffzellensystem, Injektor/Ejektor-Anodensystem, Wasserstofftanks, Wärme-management, Energiemanagement und Steuerungen. Der VW Passat GTE wurde als Fahrzeugplattform für alle Entwicklungsaktivitäten ausgewählt, siehe Abbildung 8.

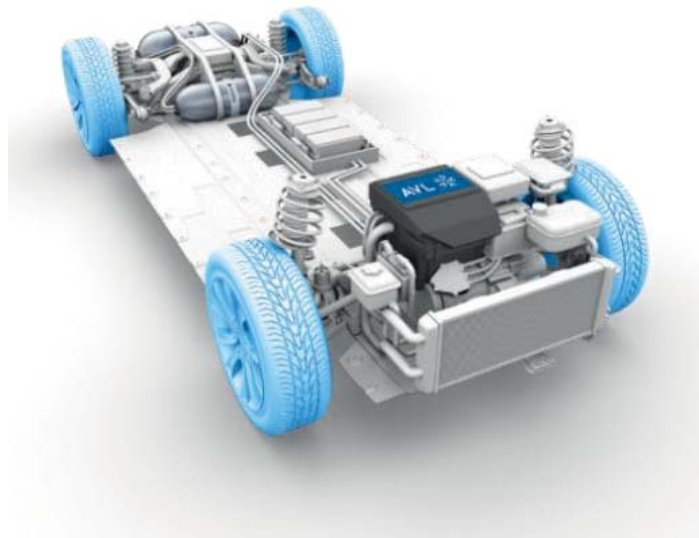


Abbildung 8: Fahrzeuglayout – KEYTECH4EV

Das bereits vorhandene Batteriesystem (Batteriepaket, Batteriekühlung und Plug-in Laden inklusive Leistungselektronik) wird genutzt, wohingegen alle anderen Antriebsstrangkomponenten durch Eigenentwicklungen ersetzt werden, um einen innovativen, elektrifizierten Antriebsstrang (E-Motor, Leistungselektronik, Brennstoffzellensystem, Steuerungshardware und -software) zu schaffen; siehe technische Daten in Tabelle 2. Dieser konzeptionelle Ansatz wird die Akzeptanz der Elektromobilität in der Öffentlichkeit erhöhen, da er Reichweiten von über 600 km pro Tankfüllung und kurze Betankungsdauern von etwa 3 Minuten erlaubt. Gleichzeitig werden die Gesamtkosten für den Antriebsstrang im Vergleich zu FC-dominanten und rein batterieelektrischen EVs reduziert.

Tabelle 2: Technische Daten KEYTECH4EV

Fahrzeugplattform	VW Passat GTE
Batterie Kapazität / Leistung	9.9 kWh / 85 kW
FC-System Leistung	~60 kW
e-drive Leistung	110 kW
Wasserstofftank Kapazität	5.3 kg
Wasserstoffverbrauch	0.85 kg / 100 km (berechnet)
Reichweite	>600 km (NEFZ, 5 kg H ₂ inkl. reiner Batteriereichweite)

4.2 Kleinbusse

Im Rahmen des geförderten Forschungsprojektes FCREEV [9,18] hat das Konsortium bestehend aus Magna Steyr Engineering AG & Co. KG, Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik (Technische Universität Wien), HyCentA Research GmbH und Proton Motor Fuel Cell GmbH ein Brennstoffzellen Range Extender Konzept entwickelt und aufgebaut, siehe Abbildung 9. Die Kosten für den Antriebsstrang von BEVs und FCEVs hängen wesentlich von der Produktionsmenge ab. Bei geringen Stückzahlen hat das Brennstoffzellen Range Extender Konzept das Potenzial die Kosten zu senken und sogar

jene von BEVs, bei einer gleichzeitigen Erhöhung der Reichweite um 100-150 km, zu unterschreiten.

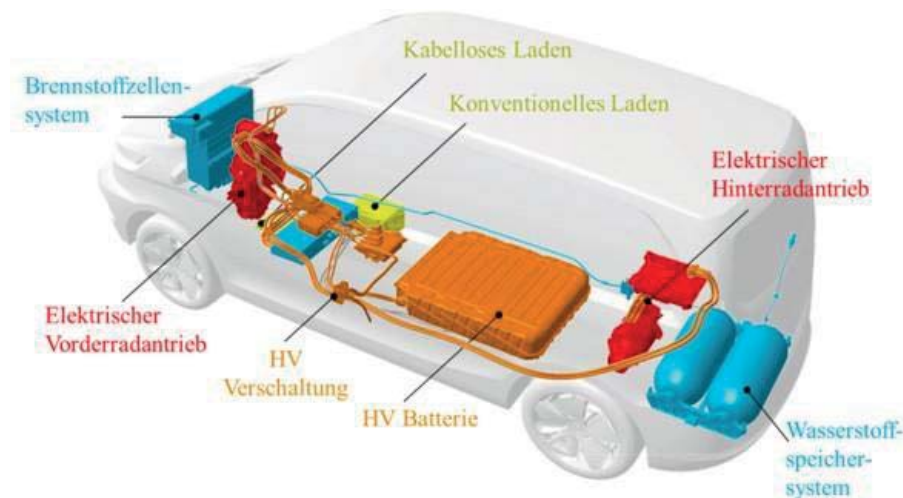


Abbildung 9: FCREEV [18]

Der Antriebsstrang besteht aus den elektrischen Antriebssystemen (DC/AC-Umrichter, Elektromotor und einstufigem Getriebe) für die Vorder- und Hinterachse des Fahrzeugs, dem Brennstoffzellensystem (BZ-Stack, Nebenaggregate, DC/DC-Wandler und Steuereinheit), der HV-Batterie (Li-Ion) sowie verschiedenen Ladesystemen und der Leistungselektronik zur Spannungswandlung im Leistungsverorgungssystem. Rein batterieelektrischer Betrieb ist bei einem hohen Ladezustand (SOC – State of Charge) erlaubt, um eine Entladung der Batterie zu erreichen. Mit dieser Konfiguration sind Reichweiten bis zu 70 km ohne Unterstützung der Brennstoffzelle möglich, wodurch die durchschnittliche tägliche Reichweite der Kunden erreicht wird. Bei niedrigeren SOC-Werten wird durch eine intelligente Betriebsstrategie eine möglichst hohe Reichweite und der Betrieb des 25 kW Brennstoffzellensystems bei möglichst hoher Effizienz (max. 54 %, siehe Abbildung 10) gewährleistet.

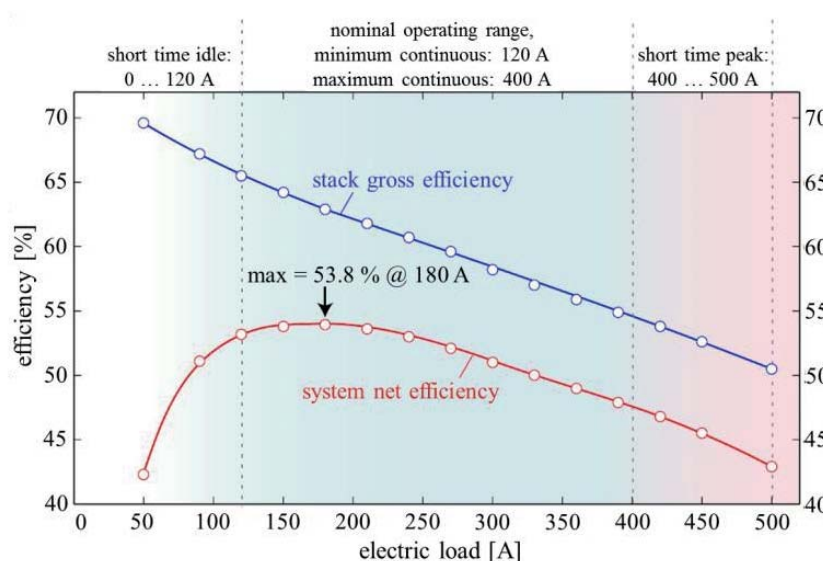


Abbildung 10: Wirkungsgrad von FC-Stack und System über der elektrischen Last [18]

Der Range Extender (Brennstoffzelle) wird jedoch nicht primär für die Bereitstellung der Leistung in allen Betriebsbereichen verwendet, sondern zur Deckung des durchschnittlichen Leistungsbedarfs. Der Spitzenleistungsbedarf und die regenerative Bremsenergie werden durch die Batterie gedeckt. Die Kombination beider Energiequellen ermöglicht höhere zur Verfügung stehende Leistungen und größere Reichweiten (>350 km) ohne Betankung oder Aufladen. Durch das FCREEV-Konzept wird die Brennstoffzelle häufig stationär und in Bereichen mit geringer Degradation betrieben. Prüfstandsuntersuchungen zeigten nach 5000 Betriebsstunden eine Degradation von weniger als 7 %, wodurch eine ausreichende Brennstoffzellenleistung über die gesamte Lebensdauer des Fahrzeugs sichergestellt werden kann.

4.3 Heavy-Duty Anwendungen

Angesichts der hohen Energiedichte von Wasserstoff und der Vorteile von FCEV-Antrieben werden diese besonders bei Bussen, LKWs, Schwerlasttransportern und nicht elektrifizierten Zügen an Bedeutung zunehmen. Die Anwendung von PEMBZ im Heavy-Duty-Bereich wurde bisher völlig unterschätzt.



Abbildung 11:
FC bus – Toyota [20]



Abbildung 12:
FC truck – COOP [12]



Abbildung 13:
FC train - Alstom [1]

Brennstoffzellenbusse haben sich seit Jahren bewährt und mehrere hundert Busse sind weltweit im Einsatz. In Europa finanziert das FCH-JU Brennstoffzellen-Busprojekte, wobei in Europa bislang etwa 84 Brennstoffzellenbusse in Betrieb sind [6]. Vor allem in Asien nehmen F&E-Aktivitäten stark zu; z. B. Lianyungang Haitong Public Transport (China) plant die Anschaffung von 1500 FCEV-Bussen und Toyota will bei den Olympischen und Paralympischen Spielen 2020 in Tokio über 100 FCEV-Busse einsetzen, siehe Abbildung 11. Brennstoffzellensysteme für Busse sind so ausgelegt, dass sie eine geringe Degradation aufweisen, in Vergangenheit konnten Degradationsraten von 10 % nach 10.000 h nachgewiesen werden [17]. Die Entwicklung der nächsten Generation von Brennstoffzellensystemen für Heavy Duty Anwendungen zielt dabei auf 25.000 h. Darüber hinaus verbrauchen Brennstoffzellenbusse mit einer Leistung von 200 kW 8 bis 9 kg Wasserstoff und erzielen Reichweiten von 300 bis 450 km [6,17]. Somit bieten BZ-Busse hohe Lebensdauer, hohe TtW-Effizienz und die Flexibilität eines Dieselmotors bei null Schadstoffemissionen. Gleiches gilt für BZ-LKW-Anwendungen. Mehrere LKW-Konzepte sind in Entwicklung (Toyota, Nikola Motor Company und COOP in Abbildung 12), um eine emissionsfreie Logistik in Städten und Überland zu ermöglichen. Zudem zeigen Veröffentlichungen die Grenzen der batteriebetriebenen Elektrofahrzeuge im Heavy-Duty Bereich. Für einen batterieelektrischen LKW mit einer Reichweite von 400 km und einem höchstzulässigen Gesamtgewicht von 19 Tonnen bleibt aufgrund der hohen Masse der für diese Reichweite notwendigen Batterie nur mehr eine Nutzlast von einer Tonne [11]. Im

Vergleich dazu ist die Nutzlast von einem Brennstoffzellen LKW mit circa 6 Tonnen ähnlich derer eines Diesel LKWs mit 6,5 Tonnen, siehe Abbildung 14.

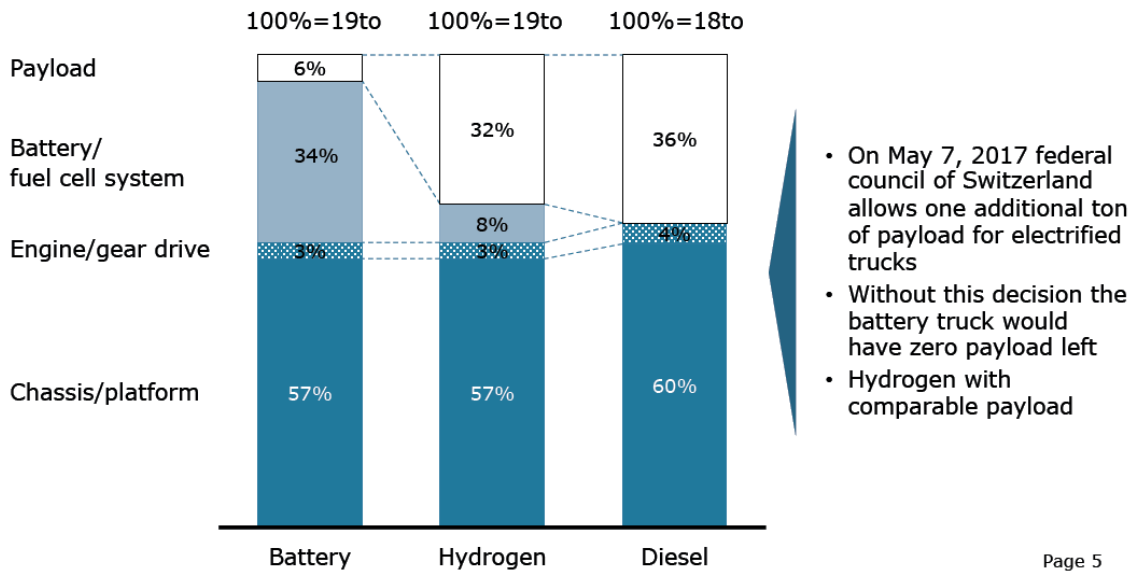


Abbildung 14: Nutzlast von 18t LKWs bei 400 km Reichweite [11]

Für nicht elektrifizierte Bahnstrecken, in denen heute überwiegend Diesel-Züge zum Einsatz kommen, bietet der PEMBZ-Antriebsstrang eine emissionsfreie Alternative. Deutschland kündigte kürzlich die Inbetriebnahme der ersten Wasserstoffzüge an. Alstom hat den Coradia iLint mit einer Leistung von 400 kW, einer Wasserstoffspeicherkapazität von 180 kg und einer Reichweite von 600 bis 800 km entwickelt; siehe Abbildung 13. Darüber hinaus sind FCEV-Züge bereits mit Diesel-Zügen (aus Total Cost of Ownership-Sicht) wettbewerbsfähig.

4.4 Spezialfahrzeuge

PEMBZ-Technologien können in einer Reihe von Spezialfahrzeugen Anwendung finden, die für verschiedene spezifische Zwecke in Nutzfahrzeugen (Bau, Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Logistik usw.) und Freizeitfahrzeugen (Sport und Tourismus) eingesetzt werden können. Die meisten dieser Fahrzeuge werden heute noch von ICEs angetrieben, wobei deren Elektrifizierung ein großes Reduktionspotenzial für Treibhausgasemissionen besitzt und die Chance bietet, neue Geschäftsfelder zu erschließen. Im Rahmen des vom österreichischen Klima- und Energiefonds geförderten Projekts HySnow, werden Offroad-Fahrzeuge für den Wintertourismus mit PEMBZ-Antriebssystem und einer dezentralen grünen Wasserstoff-Infrastruktur auf Basis der Hochdruck-PEM-Elektrolyse entwickelt. Ein rein batterieelektrischer Antriebsstrang kann dafür a priori ausgeschlossen werden, da Batterien bei kalten Witterungsbedingungen mehrere Nachteile wie eingeschränkte Ladefähigkeit, geringe Energiekapazität und damit verbundene geringe Reichweiten aufweisen. Die vielversprechendste emissionsfreie Antriebstechnologie für Offroad-Fahrzeuge bei kalten Bedingungen ist die wasserstoffbetriebene PEMBZ. Die Vorteile sind: Betrieb bei Kälte, hohe Effizienz, schnelle Inbetriebnahme, Modularität und hohe Leistungsdichte. Eine mit Wasserstoff betriebene PEMBZ bietet ähnliche Leistung, Reichweite und Betankungszeit wie ein modernes benzin- oder dieselpetriebenes Fahrzeug.

5 Tank-to-Wheel-Effizienz im Jahresvergleich

Verschiedene Veröffentlichungen haben gezeigt, dass die notwendige Energie für die Klimatisierung des Fahrgastraumes (Heizen und Kühlen) die Reichweite von BEVs, abhängig von den Umgebungsbedingungen, um bis zu 50 % reduziert [5,14]. Im Folgenden wird der Einfluss der Klimatisierung auf die Tank-to-Wheel-Effizienz (TtW) von BEVs und FCEVs über ein ganzes Jahr hinweg betrachtet werden.

Abbildung 15 zeigt den typischen Energiebedarf eines Mittelklassefahrzeugs für den Antrieb (Traktion) und für die Klimatisierung der Fahrgastzelle über ein Jahr. Diese Werte sind unabhängig von der Antriebstechnologie und nur von der Fahrzeugausführung abhängig. Der Energiebedarf für die Traktion basiert auf dem WLTP (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure) Zyklus bei betriebswarmem Zustand. Zusätzliche Aufwärmeeffekte sind dabei nicht berücksichtigt. Zur Ermittlung des Energiebedarfs für das Kühlen bzw. Beheizen wurde ein für Österreich repräsentatives jährliches Temperaturprofil herangezogen, das aus Messwerten der Klimaabteilung der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) abgeleitet ist.

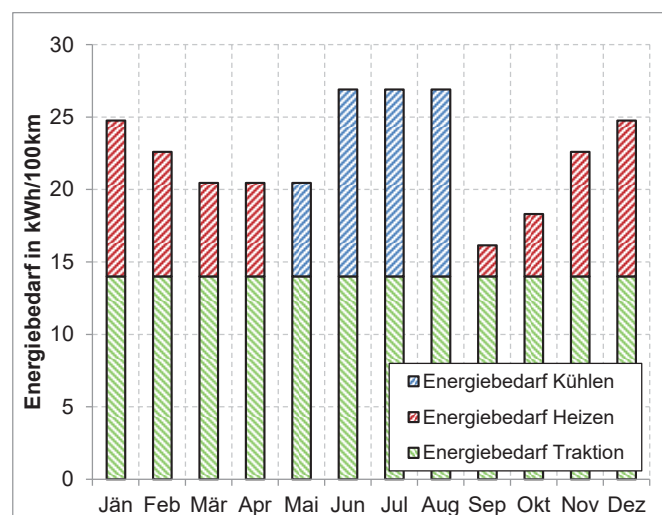


Abbildung 15: Energiebedarf Traktion und Klimatisierung im Fahrzeug

Für die Berechnung des Energieaufwands (bezogen auf den Energiebedarf im Tank bzw. in der Batterie) der Kühlung wurde eine elektrisch angetriebene Kältemaschine mit einer Leistungszahl von 2,33 verwendet. Für die Heizung wurde ein PTC-Heizelement mit einem Wirkungsgrad von 95 % berücksichtigt. Der Antriebsstrangwirkungsgrad wurde mit 55 % für das FCEV und mit 85% für das BEV angesetzt. Der Antriebsstrangwirkungsgrad ist der Quotient aus Antriebsleistung am Rad und der für den Antrieb notwendigen chemisch gebundenen Energie im Kraftstofftank beziehungsweise der gespeicherten elektrischen Energie in der Batterie.

In Abbildung 16 sind die Topologien des FCEV und des BEV mitsamt den Leistungsflüssen dargestellt. Bei BEVs umfasst die Wirkungsgradkette des Antriebsstrangs das Entladen der Batterie, Leistungselektronik (Spannungswandlung, etc.) und den E-Motor. Bei FCEVs kommt meist noch eine zusätzliche Wandlungsstufe hinzu, die den Wirkungsgrad reduziert.

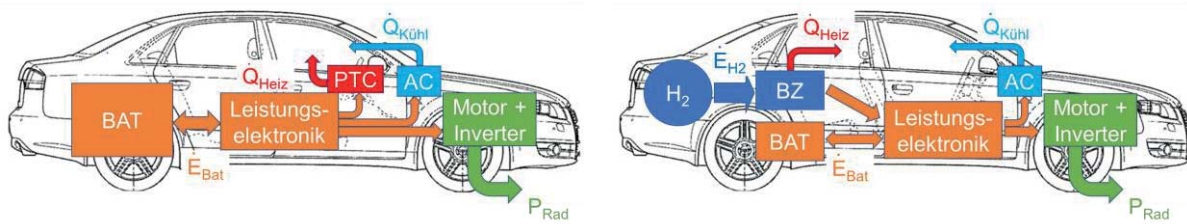


Abbildung 16: Leistungsflüsse BEV (links) und FCEV (rechts)

Bei BEVs fällt auf Grund des hohen Antriebsstrangwirkungsgrades keine nutzbare Abwärme an und so muss die nötige Heizwärme elektrisch erzeugt werden. Dies erfolgt üblicherweise mittels PTC-Heizelementen. Bei FCEVs kann die anfallende Abwärme des Brennstoffzellensystems zur Heizung des Fahrgastraums verwendet werden. Bei sehr kalten Bedingungen ist auch bei FCEVs eine elektrische Zusatzheizung (PTC) notwendig. Die Kühlung erfolgt bei beiden Fahrzeugen mittels elektrisch angetriebenen Kältemaschinen (AC).

Relevant für die Effizienzbewertung des Gesamtfahrzeugs ist nicht nur der Antriebsstrangwirkungsgrad, sondern vor allem der Gesamtfahrzeugwirkungsgrad, hier als TtW-Effizienz bezeichnet. Die TtW-Effizienz ist der Quotient aus der Antriebsleistung am Rad zum Gesamtleistungsbedarf des Fahrzeugs, somit inklusive des Leistungsbedarfs für die Heizung und Kühlung der Fahrgastzelle. Abbildung 17 zeigt die TtW-Effizienz und den Antriebsstrangwirkungsgrad beider Fahrzeuge.

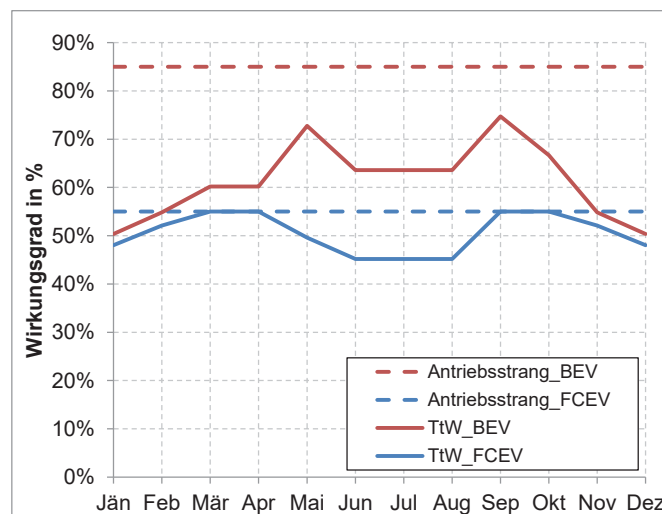


Abbildung 17: TtW-Effizienz und Antriebsstrangwirkungsgrad von FCEV und BEV

Bei BEVs muss elektrische Energie im PTC Heizelement in Wärme umgewandelt werden, wodurch die TtW-Effizienz im Winter bis auf circa 50 % sinkt. Auf Grund der nutzbaren Abwärme beim FCEV liegt die TtW-Effizienz bei kalten Bedingungen knapp bei der des BEVs. Im Sommer steigt die TtW-Effizienz des BEVs an, während die des FCEVs abnimmt. Aufgrund der getroffenen Randbedingungen ist der notwendige Energiebedarf der Kühlung des Innenraums für BEV und FCEV gleich. Dieser zusätzliche Aufwand führt dazu, dass die TtW-Effizienz beim FCEV circa 45 % und beim BEV circa 64 % beträgt. Höchste TtW-Effizienz wird bei beiden Fahrzeugen in den Übergangsmonaten (Frühling und Herbst) erreicht. Im Jahresmittel erreicht das BEV eine TtW-Effizienz von circa 61 % und das FCEV von circa 50 %.

Wie zu Beginn angemerkt, beziehen sich die angestellten Betrachtungen auf ein Fahrzeug mit gleichem Energiebedarf im WLTP-Zyklus. Aufgrund der geringeren Energiedichte von Batterien im Vergleich zu Wasserstoffspeichersystemen ergibt sich bei dieser Betrachtung eine deutlich geringere Reichweite des BEVs. Würde als gemeinsame Bezugsbasis nicht der gleiche Energiebedarf der Fahrzeuge, sondern die gleiche Reichweite herangezogen werden, so hätte dies eine deutlich höhere Fahrzeugmasse für das BEV und dadurch auch einen höheren Energiebedarf im Testzyklus zur Folge.

6 Zusammenfassung

Die großen Herausforderungen für den zukünftigen Straßenverkehr und damit die globale Automobilindustrie sind individuelle Mobilität, Reduktion des Energieverbrauchs und Dekarbonisierung. Um diesen Herausforderungen gerecht zu werden, spielen Elektrofahrzeuge mit Batterie- und Brennstoffzellentechnologie die Schlüsselrolle. Reine Batterie-Elektrofahrzeuge eignen sich für kleinere Fahrzeuge mit geringen Reichweiten, während Brennstoffzellen eher für größere Fahrzeuge mit hohen Reichweiten und höheren Leistungsanforderungen gut geeignet sind.

Relevant für die Effizienzbewertung des Gesamtfahrzeugs ist nicht nur der Antriebsstrangwirkungsgrad, sondern vor allem die TtW-Effizienz. Verschiedene Veröffentlichungen haben gezeigt, dass die notwendige Energie für die Klimatisierung des Fahrgastraumes (Heizen und Kühlen) die Reichweite von BEVs deutlich reduziert. Entsprechend der dargestellten Analyse erreicht das BEV im Jahresmittel eine TtW-Effizienz von circa 61 % und das FCEV circa 50 %. Damit liegt die tatsächliche Jahresmittel TtW-Effizienz von BEV deutlich unter den oftmals publizierten idealisierten Antriebsstrangwirkungsgraden von circa 85 %. Bei FCEV ist der Unterschied zwischen Antriebsstrangwirkungsgrad und Jahresmittel TtW-Effizienz gering.

Der PEM Brennstoffzellentechnologie in Kombination mit grünem Wasserstoff kommt eine essentielle Bedeutung zur Emissionsreduktion zu, da diese die geringsten CO₂-Emissionen aller Fahrzeugkonzepte über den gesamten Lebenszyklus (Produktion, Betrieb, Recycling) aufweist. Selbst bei der Verwendung von Wasserstoff aus Dampfreformierung sind die Emissionen eines PEM FCEV um 20 bis 30 % geringer als bei einem vergleichbaren Fahrzeug mit Verbrennungsmotor. Zusätzlich weisen Elektrofahrzeuge mit PEM Brennstoffzellen in Großserie geringere Kosten als reine batterieelektrische Fahrzeuge bei gleichen Stückzahlen auf. Die ersten serienreifen Brennstoffzellen-PKWs zeigen die technologische Machbarkeit und weitere Entwicklungspotenziale werden in österreichischen und internationalen Forschungsprojekten untersucht und umgesetzt. In Österreich veranschaulicht die Energie-Modellregion WIVA P&G (Wasserstoffinitiative Vorzeigeregion Austria Power & Gas) mit einem Projektvolumen von rund 120 Mio.€ die Umstellung des österreichischen Energiesystems auf grünen Wasserstoff und Ökostrom, gefördert durch den Klima- und Energiefonds. Dabei werden mehrere Mobilitätsanwendungen (Spezialfahrzeuge, Fahrzeugflotten, Busse, LKWs usw.) entwickelt und im realen Einsatz demonstriert.

7 Abkürzungsverzeichnis

BEV	Battery Electric Vehicle	PEMBZ	Polymer-Elektrolyt-Membran-BZ
BZ	Brennstoffzelle	PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
CNG	Compressed Natural Gas	PTC	Positive Temperature Coefficient
EV	Electric Vehicle	SMR	Steam Methane Reforming
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle	TCO	Total Cost of Ownership
HEV	Hybrid Electric Vehicle	THG	Treibhausgas
ICE	Internal Combustion Engine	TtW	Tank-to-Wheel
Li-Ion	Lithium-Ionen	VKM	Verbrennungskraftmaschine
NiMH	Nickel-Metallhydrid	WtT	Well-to-Tank
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus	WtW	Well-to-Wheel
PEM	Polymer-Elektrolyt-Membran	WLTP	Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure

8 Referenzen

1. Alstom, <http://www.alstom.com/press-centre/2017/03/alstoms-hydrogen-train-coradia-ilint-first-successful-run-at-80-kmh/>, (20.10.2017)
2. Hydrogen Council, <http://hydrogencouncil.com/>, (20.10.2017)
3. DOE - Department of Energy USA, DOE Technical Targets for Fuel Cell Systems and Stacks for Transportation Applications, <https://energy.gov/eere/fuelcells/doe-technical-targets-fuel-cell-systems-and-stacks-transportation-applications> (20.10.2017)
4. Edwards, R., Larive', J.-F., Rickeard, D. and Weindorf, W., "Well-to-Wheel Analysis of future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context.", JEC Technical Reports, 2014, doi:10.2790/95629.
5. Farrington R., Rugh P.J., Impact of Vehicle Air Conditioning on Fuel Economy, Tailpipe Emissions, and Electric Vehicle Range, NREL/CP-540e28960, National Renewable Energy Laboratory, 2000.
6. FCH JU: Fuel Cell Electric Buses – Potential for Sustainable Public Transport in Europe, The Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, 2015
7. Fritz D, Heinfellner H., Lichtblau G., Pölz W., Stranner G.: Update: Ökobilanz alternativer Antriebe, Umweltbundesamt, 2017
8. Grögera, O., Gasteiger, H., Suchsland, J.: Review—Electromobility: Batteries or Fuel Cells?, Journal of the Electrochemical Society, <http://jes.ecsdl.org/content/162/14/A2605.full>, 2015.
9. Höflinger, J.; Hofmann, P.; Müller, H.; Limbrunner, M.: FCREEV – A Fuel Cell Range Extended Electric Vehicle. In: MTZ ww 77 (2017), No. 5, pp. 16-21
10. Honda Motor, <http://world.honda.com/FuelCell>; <http://www.honda.de/cars/honda-welt/news-events/2015-10-28-honda-enthueilt-clarity-fuel-cell-auf-der-tokyo-motor.html> (24.07.2017)
11. Huber R.: Zero emission logistics with hydrogen heavy duty trucks, Presentation at the A3PS Conference 2017 "Applied Advanced Propulsion Systems", H₂ Energy AG, 2017
12. H2energy, http://h2energy.ch/wp-content/uploads/2017/06/Factsheet_Lastwagen_D.pdf, (10.12.2017)
13. Hyundai Motor Company, <https://www.hyundai.com/worldwide/en/eco/ix35-fuelcell/highlights>

14. Kambly Kiran, Bradley Thomas H.: Geographical and temporal differences in electric vehicle range due to cabin conditioning energy consumption, *Journal of Power Sources* 275 (2015) 468-475
15. Klell M., Eichlseder H., Trattner A.: *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik*, Springer Verlag, Buch 4. Auflage, 2018 (in Vorbereitung)
16. Mercedes-Benz, <https://www.mercedes-benz.com/de/mercedes-benz/fahrzeuge/personenwagen/glc/der-neue-glc-f-cell/> (20.10.2017)
17. Müller, K.; Schnitzeler, F.; Lozanovski, A.; Skiker, S.; Ojakovoh, M.: *Clean Hydrogen in European Cities*, D 5.3 – CHIC Final Report, FCH JU, 2017
18. Salman, P., Wallnöfer-Ogris, E., Sartory, M., Trattner, A. et al., "Hydrogen-Powered Fuel Cell Range Extender Vehicle – Long Driving Range with Zero-Emissions," SAE Technical Paper 2017-01-1185, 2017, <https://doi.org/10.4271/2017-01-1185>.
19. Sartory, M., Justl, M., Salman, P., Trattner, A. et al., "Modular Concept of a Cost-Effective and Efficient On-Site Hydrogen Production Solution," SAE Technical Paper 2017-01-1287, 2017, <https://doi.org/10.4271/2017-01-1287>.
20. Tokieda, Junji: „The Mirai - Life Cycle Assessment Report“, Toyota, 2015 Toyota Motor Corporation, <http://www.toyota.com> , <https://www.toyota.at/new-cars/new-mirai/index.json#1> , (20.10. 2017)