



REGION
EMSCHER-
LIPPE

TECHNOLOGIE-STECKBRIEFE

Wasserstoffmobilitätsregion Emscher-Lippe

September 2021

bottrop.

 **Stadt
Gelsenkirchen**

 **KREIS
RECKLINGHAUSEN**
DER VEREINIGTE KREIS

Gefördert durch:
 Bundesministerium
für Verkehr und
digitale Infrastruktur

Koordiniert durch:
NOW
NOW-GMBH.DE

Projekträger:
PTJ
Projektträger Jülich
Forschungszentrum Jülich

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. <u>Brennstoffzellen-Busse</u>	3
2. <u>Brennstoffzellen-Müllfahrzeuge</u>	17
3. <u>Brennstoffzellen-Nutzfahrzeuge (schwere Nutzfahrzeuge)</u>	29
4. <u>Brennstoffzellen-Nutzfahrzeuge (leichte Nutzfahrzeuge)</u>	41
5. <u>Brennstoffzellen-PKW</u>	52
6. <u>Elektrolyseure</u>	65
7. <u>Brennstoffzellen-Gabelstapler</u>	79
8. <u>Brennstoffzellen-Rangierlok</u>	91
9. <u>H₂-BHKWs</u>	103
10. <u>Projektsteckbrief Einsatz Hyundai-Sattelzüge in der Schweiz</u>	111
11. <u>Quellenverzeichnis</u>	115

1

Brennstoffzellen-Busse

An Bord eines BZ-Busses wandelt eine Brennstoffzelle Wasserstoff zu Strom um.



1	Brennstoffzellen-Busse (I/XIII)		
	Mögliche Einsatzbereiche in der Emscher-Lippe Region		Wertschöpfungsstufe
	▶ BOGESTRA AG ▶ Vestische Straßenbahnen	▶ Ggf. in den Industrieparks	 Erzeugung  Verteilung & Speicherung  Nutzung
	Kurzbeschreibung		
	▶ Brennstoffzellen-Busse (BZ-Busse) nutzen gasförmigen Wasserstoff als Energieträger. Eine Brennstoffzelle wandelt an Bord unter Hinzugabe von Sauerstoff die chemische Energie des Wasserstoffs in elektrische Energie um. Diese wiederum wird in einem Elektromotor zum Antrieb genutzt. ▶ Brennstoffzellen-Busse zählen somit auch zur Kategorie der Elektrobusse. ▶ BZ-Busse sind lokal CO₂-frei und setzen keine Stickoxid- oder Partikelemissionen frei. Ihre einzige „Emission“ ist reines Wasser bzw. Wasserdampf. ▶ Der Tankvorgang erfolgt üblicherweise an stationären H₂-Tankstellen, die eine 350 bar Druckbetankung vornehmen können (PKW werden i.d.R. mit 700 bar betankt). ▶ BZ-Busse können zwischen reinen Brennstoffzellenfahrzeugen und batterieelektrischen Fahrzeugen, bei denen zusätzlich eine Brennstoffzelle als Range-Extender zur Verlängerung der Reichweite fungiert (BZ-REX), unterschieden werden. Zudem gibt es noch Hybridbusse mit einer Brennstoffzelle sowie Verbrennungs- und Elektromotor. ▶ BZ-Busse eignen sich für die gleichen Einsatzgebiete wie konventionelle Busse. ▶ Derzeit sind weltweit ca. 200 BZ-Busse im Einsatz.		
			Muss-/Kann-Anwendung*
			2020 Muss ☐ Clean Vehicles Directive Kann ☒
			2025 Muss ☒ Clean Vehicles Directive Kann ☐
			2030 Muss ☒ Clean Vehicles Directive Kann ☐

* in Bezug auf die Anschaffung von Fahrzeugen

Je nach Funktion der Brennstoffzelle ändert sich die Systemauslegung.



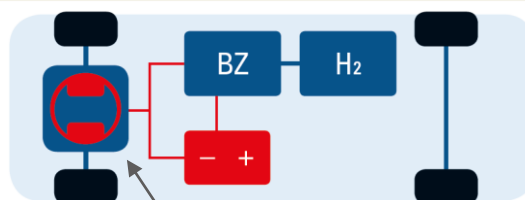
Zurück zum
Inhaltsverzeichnis

1

Brennstoffzellen-Busse (II/XIII)

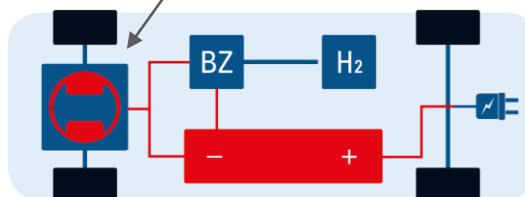
Schematische Darstellung

BZ-Bus:



Elektromotor

BZ-REX-Bus:



Vergleich:

	BZ	BZ-REX
HV-Batterie	~30 kWh	~250 kWh
H2-Tank	~25-40 kg H ₂	~15 kg H ₂
Brennstoffzelle	~170-240 kW	~30 kW

Technische Kennzahlen BZ-Bus

Komponenten:

Brennstoffzelle, H₂-Tank,
Hochvoltbatterie (HV), Elektro-Antrieb

Reichweite:

250 – 450 km

Druckstufe:

350 bar

Verbrauch:

~8,5 – 10 kg H₂/100 km

Betankungszeit:

< 10 min

Tank-to-Wheel Effizienz:

51-58 %

Brennstoffzellenbusse sind am Markt noch nicht in Serie verfügbar.

1 Brennstoffzellen-Busse (III/XIII)	
Technology Readiness Level	Anbieter (Auszug) (i/ii)
2020	Allgemein: Aufgrund des Hypes um Wasserstofftechnologien und der steigenden Dringlichkeit, den Fuhrpark umzurüsten (Feinstaubdebatte, Klimanotstand, Clean Vehicles Directive etc.), übersteigt die Nachfrage nach BZ-Bussen derzeit das Angebot. Folglich können sich die Anbieter ihre Kunden „aussuchen“, wodurch nicht alle Nachfragen bedient werden können.
2025	Solaris – Urbino 12 hydrogen: BZ-Bus <u>Technische Spezifikationen:</u> Antriebsleistung: 250 kW, Brennstoffzelle: 60 kW, Reichweite: 300-350 km, Batteriekapazität/-leistung: 29 kWh / k.A, Tankkapazität: 37,5 kg H₂, Personentransportkapazität: 37 Sitzplätze / 50 Stehplätze <u>Marktverfügbarkeit:</u> Status: ab sofort, Lieferdauer: 12 Monate, Herstellungsland: Polen, Serienproduktion: Start 2020
2030	Van Hool – A330 Fuel Cell: BZ-Bus <u>Technische Spezifikationen:</u> Antriebsleistung: 210 kW, Brennstoffzelle: 120 kW, Reichweite: 300-350 km, Batteriekapazität/-leistung: 24 kWh / 60 kW, Tankkapazität: 38 kg H₂ (bei 350 bar), Personentransportkapazität: 34 Sitzplätze / 50 Stehplätze <u>Marktverfügbarkeit:</u> Status: seit 2005, Lieferdauer: 12 Monate, Herstellungsland: Belgien, Serienproduktion: vorhanden

Immer mehr Anbieter kündigen Prototypen und Serienfertigungen für die Zukunft an.



1

Brennstoffzellen-Busse (IV/XIII)

Anbieter (Auszug) (ii/ii)

Mercedes – eCitaro FC: BZ-REX-Bus

Technische Spezifikationen:

Antriebsleistung: 250 kW, Brennstoffzelle: 60 kW, Reichweite: > 400 km, Batteriekapazität: 270 kWh (Festelektrolyt), Tankkapazität: 25 kg, Personentransportkapazität: 26 Sitzplätze / 50 Stehplätze

Marktverfügbarkeit:

Status: ab 2021, Lieferdauer: k.A., Herstellungsland: Deutschland, Serienproduktion: ab 2022/2023

SAFRA – Businova H2: Hybrid-Bus

Technische Spezifikationen:

Antriebsleistung: 250 kW, Brennstoffzelle: 30 kW, Reichweite: 300 km, Batteriekapazität/-leistung: 132 kWh / k.A., Tankkapazität: 30 kg H₂ (bei 350 bar), Personentransportkapazität: 29 Sitzplätze / 81 Stehplätze

Marktverfügbarkeit:

Status: seit 2018, Lieferdauer: 12 Monate, Herstellungsland: Frankreich, Serienproduktion: Start 2019

Weitere Hersteller (Modelle)

Alexander Dennis (Enviro 400 FC), Caetano (H₂ City.Gold), ebe EUROPA (Blue City Bus), e.Go Moove (e.Go Mover), Solaris (Urbino 18,75), Toyota (Sora), Ursus (City Smile), Van Hool (Exqui.City Fuel Cell), Wrightbus Street Deck FCEV, ...

Über Skaleneffekte werden erhebliche Kostensenkungen erwartet.

1	Brennstoffzellen-Busse (V/ XIII)		
Investition und Betrieb	2020 CAPEX ~ 620.000 € OPEX 3 %	2025 CAPEX ~ 465.000 € OPEX 3 %	2030 CAPEX ~ 310.000 € OPEX 3 %
Wirtschaft- licher Rahmen	▶ Hohen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit hat die H₂-Quelle – Optionen: Eigenerzeugung über Elektrolyse, H₂-Pipeline (gasförmig), H₂-Trailer (gasförmig) oder H₂-Trailer (Flüssigwasserstoff). ▶ Standard ist heute die Anlieferung per H₂-Trailer (gasförmig) ▶ Für die Eigenerzeugung über Elektrolyse ist der Bezug von günstigem Strom entscheidend: Pro Kilogramm Wasserstoff müssen ca. 53 kWh Strom für die Elektrolyse und weitere 4 kWh Strom für die Verdichtung aufgewendet werden. ▶ Zum Vergleich: an den öffentlichen Tankstellen in Deutschland kostet Wasserstoff 9,50 €/kg. ▶ Je nach Bezugsart ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an eine Tankstelleninfrastruktur (Verdichter, Speicher, Verdampfer/Wärmeübertrager, Vorkühler etc.), wodurch die Kosten maßgeblich beeinflusst werden. ▶ Anpassungen in der Werkstatt lassen sich in fahrzeugbedingte (Herstellung Spannungsfreiheit der HV-Batterie, Dacharbeitsstand und Deckenkran) und kraftstoffbedingte (Lüftungseinrichtungen, ATEX-Einrichtungen) Aspekte unterteilen und sind individuell zu berechnen. ▶ Der elektrische Antriebsstrang ist weniger komplex als der eines Dieselmotors (Verbrennungsmotor, Getriebe etc. entfallen) und dadurch voraussichtlich wartungsärmer. Gleichzeitig müssen (Stand heute) Brennstoffzelle und Batterie einmal während der Lebensdauer des Fahrzeuges getauscht werden.		

Bei BZ-Bussen fallen vor allem die CAPEX ins Gewicht.

1	Brennstoffzellen-Busse (VI/XIII)			
Wirtschaftliche Kennzahlen (Studie 1, Herbst 2017)		BZ-Bus	Elektrobus*	Dieselbus
	Technische Spezifikationen	Länge: 12 m Sitze: ~35 bis 40 Nutzungsdauer: 12 Jahre Verfügbarkeit: 85 % / 95 %	Länge: 12 m Sitze: ~35 bis 40 Nutzungsdauer: 12 Jahre Verfügbarkeit: 90 % / 95 %	Länge: 12 m Sitze: ~35 bis 40 Nutzungsdauer: 12 Jahre Verfügbarkeit: 95 % / 95 %
	CAPEX Kaufpreis Tankinfrastruktur	~ 620.000 € / ~ 400.000 €*** ~ 2.400.000 €	~ 450.000 € / ~ 350.000 € ~ 1.000.000 €	~ 230.000 € / ~ 250.000 €
	Treibstoff Treibstoffart Verbrauch	Wasserstoff (350 bar) 8,6 kg/100 km / 6,5 kg/100 km	Strom 150 kWh/100 km	Diesel 40 l/100 km
	Betriebskosten Bus Tankstelle Ersatzteile**	37 €/100 km / 26 €/100 km ~ 80.000 €/a ~ 60.000 € / 30.000 €	30 €/100 km / 26 €/100 km ~ 30.000 €/a ~ 90.000 € / 60.000 €	26 €/100 km / 26 €/100 km ~ 10.000 €/a

* Depotladung über Nacht

** BZ-Bus: Einmaliger Austausch BZ; Elektrobus: Einmaliger Austausch Batterie

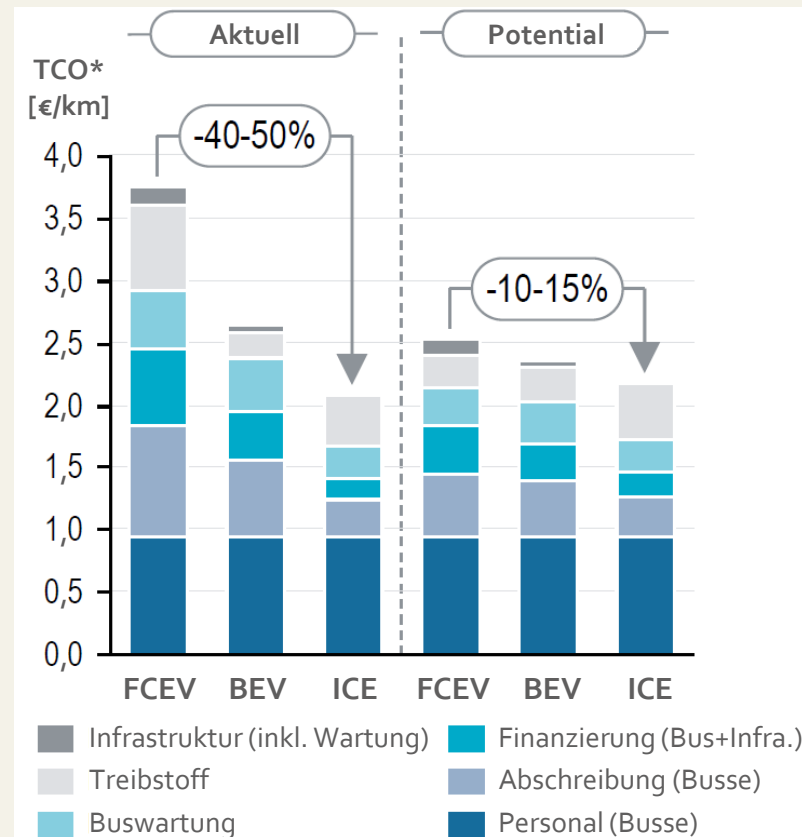
***Potenzial

Die wirtschaftliche Lücke zum Dieselbus wird perspektivisch kleiner.

1

Brennstoffzellen-Busse (VII/XIII)

Wirtschaft-
liche Kenn-
zahlen
(Studie 1,
Herbst
2017)



* TCO: Total Cost of Ownership (Vollkostenbetrachtung); ** FCEV: Fuel Cell Electric Vehicle (BZ-Fahrzeug); BEV: Battery Electric Vehicle (Batteriebetriebenes Elektrofahrzeug); ICE: Internal Combustion Engine (Auto mit Verbrennungsmotor)

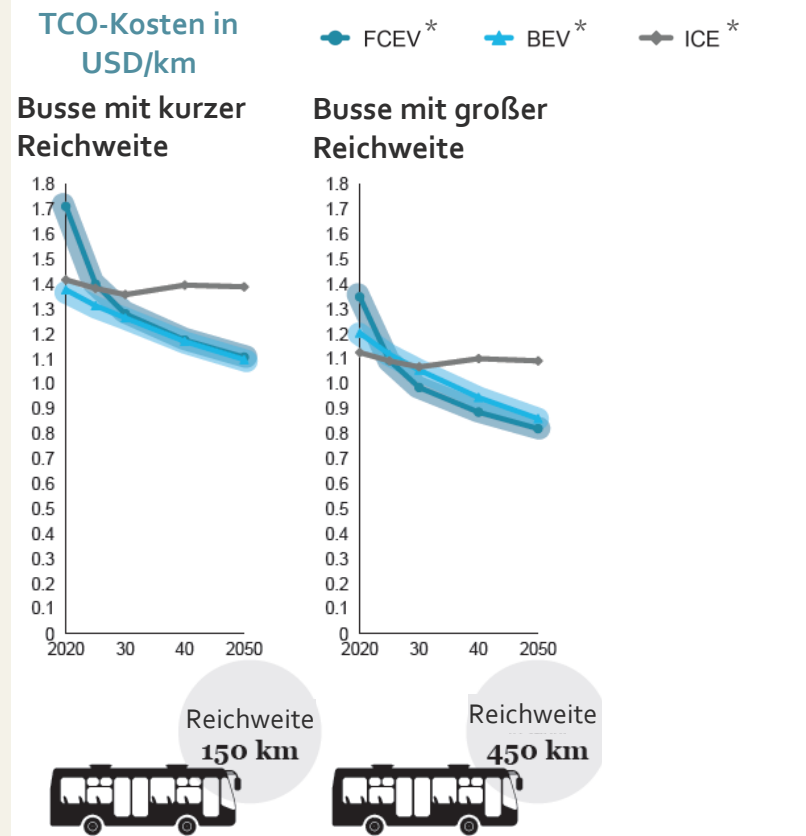
10 Stand der Erarbeitung: Januar 2021

Ab circa 2030 sind BZ-Busse günstiger oder vergleichbar teuer wie BEV-Busse.

1

Brennstoffzellen-Busse (VIII/XIII)

Wirtschaft-
liche Kenn-
zahlen
(Studie 2,
Januar
2020)



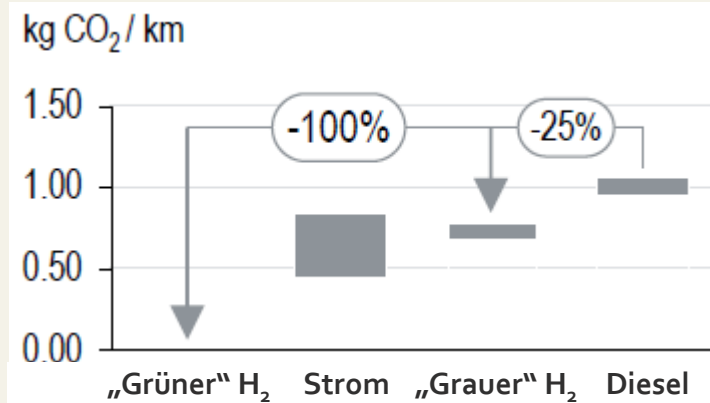
* FCEV: Fuel Cell Electric Vehicle (Brennstoffzellen-Fahrzeug); BEV: Battery Electric Vehicle (Batteriebetriebenes Elektrofahrzeug);
ICE: Internal Combustion Engine (Fahrzeug mit Verbrennungsmotor)

Die Well-to-Wheel-Emissionen hängen stark von den Kraftstoffquellen ab.

1

Brennstoffzellen-Busse (IX/XIII)

Ökologische Kenn-
zahlen
(Studie 1,
Herbst
2017)



- ▶ Die Well-to-Wheel-Emissionen hängen stark von der Quelle des Stromes und des Wasserstoffs ab.
- ▶ Nebenstehende Abbildung geht für den „grünen“ Wasserstoff von einer Erzeugung aus Strom aus Erneuerbaren Energien aus.
- ▶ Würde der Strom aus rein erneuerbaren Energien bereitgestellt, wären die Emissionen ebenfalls bei Null.
- ▶ Bei „grauem“ Wasserstoff entstehen ca. 0,75 kgCO₂ pro Kilogramm Wasserstoff.

Die Regionalverkehr Köln GmbH nutzt seit 2011 BZ-Busse.

1

Brennstoffzellen-Busse (X/XIII)

Umsetzungsbeispiel



- ▶ Die Regionalverkehr Köln GmbH (RVK) startete 2011 ihr Projekt zu BZ-Bussen.
- ▶ Projektziel ist es, eine Flotte von 52 BZ-Bussen aufzubauen und eine eigene Betankungsinfrastruktur zu realisieren. Hierzu werden zwei eigene Wasserstoff-Tankstellen errichtet und vorhandene Tankstellen im Verkehrsgebiet für die Busbetankung (350 bar) ertüchtigt.
- ▶ Das Projekt wird mit 7,4 Mio. € im Rahmen des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie sowie mit 5,4 Mio. € im Zuge des EU-Projekts JIVE gefördert.
- ▶ Die Inbetriebnahme der BZ-Busse erfolgt stufenweise:
 - ▶ Stufe 1 (2011 bis 2016): zwei Prototypen des Busses Phileas der Firma APTS (Reichweite: 250 km, Verbrauch: 15 kg H₂/100 km, Leistung BZ: 150 kW)
 - ▶ Stufe 2 (2015): zwei weitere BZ-Busse des Typs A 330 FC der Firma Van Hool (Reichweite: 300 km, Verbrauch: 9,2 kg H₂/100 km, Leistung BZ: 150 kW)
 - ▶ Stufe 3 (ab Januar 2020): Sukzessive Inbetriebnahme von 35 weiterentwickelten Bussen des Typs A 330 FC von Van Hool (Reichweite: 350 km, Verbrauch: 9 kg H₂/100 km, Leistung BZ: 80 kW)
 - ▶ Stufe 4 (bis Ende 2021 / Anfang 2022): Inbetriebnahme von 15 Bussen der Firma Solaris Bus & Coach S.A.
- ▶ Zur Kostensenkung erfolgte die Ausschreibung in Stufe 4 gemeinsam mit den Wuppertaler Stadtwerken.

Im Rahmen des NIP II sollen auch Müllsammelfahrzeuge gefördert werden.

2

Brennstoffzellen-Müllsammelfahrzeuge (XI/XIII)

Förderung



Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP II)

Bundes-Förderung: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur

- ▶ Zeitraum: 2016 bis 2026
- ▶ Förderbudget: 1,4 Mrd. € (für 10-Jahres-Zeitraum; ca. 60 % für die Marktaktivierung, 40 % für F&E für verschiedene Sektoren)
- ▶ Fördergegenstand:
 - „Investitionszuschüsse für: Fahrzeuge (Straße, Schiene und Wasser) und Flugzeuge, die mit einem Brennstoffzellenantrieb ausgestattet sind, und gegebenenfalls die für deren Betrieb notwendige Betankungs- und Wartungsinfrastruktur.. (...)“
 - Regierungsprogramm zur Fortsetzung des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie 2006 – 2016*
- ▶ Ablauf: Zur Antragseinreichung wird über einzelne befristete Calls aufgerufen, in denen die jeweiligen Förderschwerpunkte und die Rahmenbedingungen der Förderung präzisiert werden.
- ▶ Art der Zuwendung: nicht zurückzahlbarer Zuschuss; Kumulierungsverbot (für gleiche Kosten)
- ▶ Zuwendungshöhe: „Bemessungsgrundlage für Zuwendungen sind die zuwendungsfähigen projektbezogenen Ausgaben. Dies sind diejenigen Mehrausgaben, die durch den Einsatz der geförderten innovativen Technologie gegenüber dem Einsatz konventioneller Technologie bedingt sind. Gemäß Artikel 36 AGVO können die Investitionsmehrkosten mit bis zu 40 % bezuschusst werden. KMU können im Einzelfall höhere Beihilfeintensitäten gewährt werden. Bei PKW mit Brennstoffzellenantrieb (nach Nummer 2.1.1) erfolgt die Förderung ab einer näher im Aufruf zur Antragseinreichung festgelegten Mindeststückzahl.“

Nordrhein-Westfalen fördert 60 % der Mehrkosten.

1

Brennstoffzellen-Busse (XII/XIII)

Förderung



Gesetz über den öffentlichen Personennahverkehr in Nordrhein-Westfalen (Nach § 13 Absatz 1 Nr. 6 ÖPNVG NRW)

Landes-Förderung: Ministerium für Landesentwicklung und Verkehr

- ▶ Förderhöhe: 60 % des Differenzbetrages zwischen einem wasserstoffbetriebenem Bus und einem vergleichbaren Dieselbus
- ▶ Fördergegenstand:
 - ▶ Brennstoffzellen-Busse
 - ▶ Notwendige Infrastruktur (Wasserstofftankstellen)
 - ▶ Notwendige Werkstatteinrichtungen (z. B. Hocharbeitsplätze)
- ▶ Antragsberechtigt:
 - ▶ Kreise, Städte und Gemeinden
 - ▶ Öffentliche und private Verkehrsunternehmen
 - ▶ Jur. Personen des privaten Rechts, die Zwecke des ÖPNV verfolgen

BZ-Busse bieten eine sehr hohe Routenflexibilität und große Reichweiten.

1

Brennstoffzellen-Busse (XIII/XIII)

Vergleich zu Alternativtechnologien

BZ-Bus	Batteriebus	Dieselsbus
Vorteile - Hohe Reichweite: bis zu 450 km - Keine Routen-Einschränkungen - Vorteile bei hügeligen Fahrprofilen ggü. Batteriebussen - Keine Infrastruktur auf der Route notwendig - Keine lokalen Emissionen - Geringere Geräuschbelastung (im Vergleich zum Dieselsbus) - Schnelle Betankung: < 10 min - Geringere Wartungskosten Nachteile - Höhere Investitionskosten (als Batterie- und Dieselsbusse) - Aktuell schlechte Verfügbarkeit - Verfügbarkeit von grünem H₂ lokal unterschiedlich - Werkstattbetrieb muss angepasst und Personal geschult werden	Vorteile - Niedrigere Investitionskosten (als BZ-Busse): 500.000 - 650.000 € - Keine lokalen Emissionen - Geringere Geräuschbelastung (im Vergleich zum Dieselsbus) - Hohe Erfahrungswerte: > 400.000 Elektrobusse weltweit im Einsatz - Geringere Wartungskosten Nachteile - Geringere Reichweite: 150 - 300 km - Höhere Investitionskosten (als Dieselsbusse) - Bei Depotladung: Einschränkungen bei langen und hügeligen Routen - Hohe Investitionskosten bei Infrastruktur auf der Route (Ladung über Pantograph, induktives Laden) - Werkstattbetrieb muss angepasst / Personal geschult werden	Vorteile - Hohe Reichweite: > 500 km - Vorhandene Infrastruktur - Personal mit Technik vertraut - Niedrigere Investitions- und Betriebskosten Nachteile - Hohe lokale Emissionen - Höhere Geräuschbelastung - Sinkende gesellschaftliche und politische Akzeptanz - Keine mittelfristige Perspektive (s. Clean Vehicles Directive)

Brennstoffzellen-Müllsammelfahrzeuge

Die Markteinführung von Brennstoffzellen-Müllsammelfahrzeuge hat erst begonnen.



Zurück zum
Inhaltsverzeichnis

2

Brennstoffzellen-Müllsammelfahrzeuge (I/XI)

Mögliche Einsatzbereiche in der Emscher-Lippe Region

- ▶ AGR mbH
- ▶ BEST
- ▶ Gelsendienste
- ▶ Zentraler Betriebshof Herten

Kurzbeschreibung

- ▶ Brennstoffzellen-Müllsammelfahrzeuge nutzen gasförmigen Wasserstoff als Energieträger. Eine Brennstoffzelle wandelt an Bord unter Hinzugabe von Sauerstoff die chemische Energie des Wasserstoffs in elektrische Energie um. Diese wiederum wird in einem Elektromotor zum Antrieb genutzt.
- ▶ Die bisher verfügbaren Fahrzeuge sind als Brennstoffzellen Range-Extender ausgelegt, d.h. die Hauptleistung wird von einer Batterie zur Verfügung gestellt.
- ▶ Brennstoffzellen-Müllsammelfahrzeuge sind lokal CO₂-frei und setzen keine Stickoxid- oder Partikelemissionen frei. Ihre einzige „Emission“ ist reines Wasser bzw. Wasserdampf.
- ▶ Der Tankvorgang erfolgt üblicherweise an stationären H₂-Tankstellen, an denen die Fahrzeuge bei 700 bar oder 350 bar betankt werden.
- ▶ Die Markteinführung von Brennstoffzellen-Müllsammelfahrzeuge hat in Deutschland gerade erst begonnen, so dass praktische Erfahrungen aktuell noch sehr gering sind.
- ▶ In den am Markt verfügbaren Fahrzeugen kommen nahezu ausschließlich PEM-Brennstoffzellen zum Einsatz.

Wertschöpfungsstufe



Erzeugung



Verteilung &
Speicherung



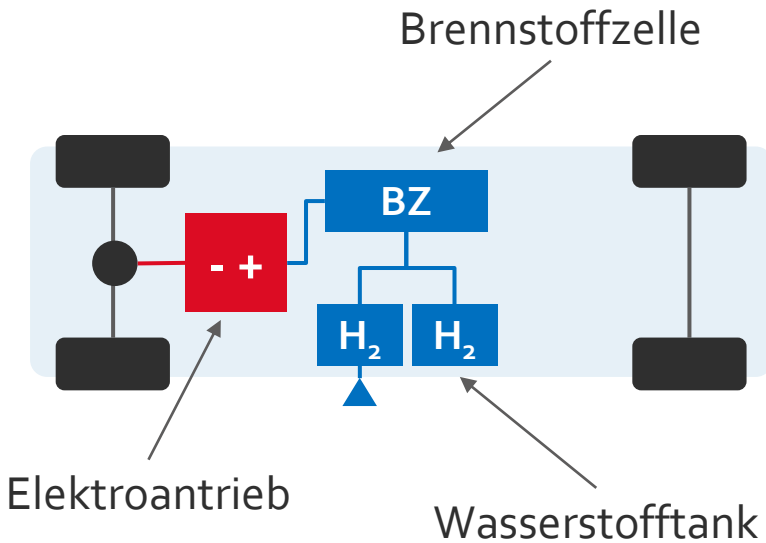
Nutzung

Muss-/Kann-Anwendung*

2020	Muss	☐	Clean Vehicles Directive
	Kann	☒	
2025	Muss	☒	Clean Vehicles Directive
	Kann	☐	
2030	Muss	☒	Clean Vehicles Directive
	Kann	☐	

* in Bezug auf die Anschaffung von Fahrzeugen

BZ-Müllsammelfahrzeuge werden modular mit BZ Systemen ergänzt.

2	Brennstoffzellen-Müllsammelfahrzeuge (II/XI)	
Schematische Darstellung		Technische Kennzahlen
		Komponenten: Brennstoffzelle, H₂-Tank, Batterie, Elektro-Antrieb Reichweite: Ca. 400 km Druckstufe: 700 bar / 350 bar Tankinhalt: 4,5 – 30 kg (je nach Set-Up) Verbrauch: 7 – 10 kg / 100 km (Vergleichswert: 10 l $\equiv$ 1 kg H₂) Betankungszeit: ca. 7 - 15 min

FAUN beginnt mit ersten Testbetrieben in verschiedenen Städten Deutschlands.

2		Brennstoffzellen-Müllsammelfahrzeuge (III/XI)																		
Technology Readiness Level		Anbieter (Auszug) (i/ii)																		
2020	F & E ☐	FAUN Bluepower: Der Faun Bluepower ist ein vollelektrisches Fahrgestell. Je nach Leistungsprofil kann das Fahrgestell modular mit Batterien und Brennstoffzellen als Range-Extender ausgestattet werden. Die Modelle sind immer als Plug-In Hybrid konstruiert und haben einen 700 bar Tank. Das Fahrgestell soll mit Rotopress und Viajet ausgestattet werden.																		
	Kleinserie ☒																			
	Serienreife ☐																			
2025	F & E ☐																			
	Kleinserie ☐																			
	Serienreife ☒																			
2030	F & E ☐																			
	Kleinserie ☐																			
	Serienreife ☒																			
		<table><tr><td>Antrieb:</td><td>Elektromotor (280 kW)</td></tr><tr><td>Leistung:</td><td>85 kWh (Batterie) + 30 – 90 kW (Brennstoffzelle)</td></tr><tr><td>Reichweite:</td><td>Bis 400 km</td></tr><tr><td>Nutzlast:</td><td>10 t</td></tr><tr><td>Tankinhalt:</td><td>4 – 18 kg (700 bar)</td></tr><tr><td>Verbrauch:</td><td>7 – 10 kg/100 km (Vergleichswert: 10 l ≡ 1 – 2 kg H2)</td></tr><tr><td>Preis:</td><td>650.000 – 900.000 €</td></tr><tr><td>Gewicht:</td><td>ROTOPRESS : 7,7t (NL 4,3 t) – 20,2 (NL 19,8)</td></tr><tr><td>Serienproduktion:</td><td>Ab 2020</td></tr></table>	Antrieb:	Elektromotor (280 kW)	Leistung:	85 kWh (Batterie) + 30 – 90 kW (Brennstoffzelle)	Reichweite:	Bis 400 km	Nutzlast:	10 t	Tankinhalt:	4 – 18 kg (700 bar)	Verbrauch:	7 – 10 kg/100 km (Vergleichswert: 10 l ≡ 1 – 2 kg H2)	Preis:	650.000 – 900.000 €	Gewicht:	ROTOPRESS : 7,7t (NL 4,3 t) – 20,2 (NL 19,8)	Serienproduktion:	Ab 2020
Antrieb:	Elektromotor (280 kW)																			
Leistung:	85 kWh (Batterie) + 30 – 90 kW (Brennstoffzelle)																			
Reichweite:	Bis 400 km																			
Nutzlast:	10 t																			
Tankinhalt:	4 – 18 kg (700 bar)																			
Verbrauch:	7 – 10 kg/100 km (Vergleichswert: 10 l ≡ 1 – 2 kg H2)																			
Preis:	650.000 – 900.000 €																			
Gewicht:	ROTOPRESS : 7,7t (NL 4,3 t) – 20,2 (NL 19,8)																			
Serienproduktion:	Ab 2020																			
		https://www.m-r-n.com/veranstaltungen/2020/200117%20Wasserstoff%20aus%20Abf%C3%A4llen/oo-Pr%C3%A4sentation-FAUN.ppt																		

https://www.m-r-n.com/veranstaltungen/2020/200117%20Wasserstoff%20aus%20Abf%C3%A4llen/oo_Pr%C3%A4sentation_FAUN.pdf

E-Trucks hat bisher die größte praktische Erfahrung.

2

Brennstoffzellen-Müllsammelfahrzeuge (IV/XI)

Anbieter (Auszug) (ii/ii)

E-Trucks Europe – Hydrogen Ready

Antrieb:	Elektromotor (200kw)
Leistung:	136 kWh (Batterie) + 30 - 136 kW (Brennstoffzelle)
Reichweite:	ca. 200 km bei 15 kg H ₂ (Vergleichswert: 10 l $\equiv$ 1 kg H ₂)
Tankinhalt:	15 kg – 30 kg (350 bar)
Verbrauch:	7 – 10 kg/100 km
Preis:	600.000 – 650.000 €

Bisher Erfahrungen aus 7 Anwendungsprojekten in den Niederlanden und der Schweiz.

Weitere Hersteller: M.A.N. (?); ULEMCo. (GB); Navistar (US); Holthausen; ...

<https://newmobility.news/2020/11/20/antwerp-gets-two-garbage-trucks-on-hydrogen/>

Skaleneffekte und zunehmende Technologiereife versprechen Kostensenkungen.

2

Brennstoffzellen-Müllsammelfahrzeuge (V/ XI)

Investition und Betrieb	2020 CAPEX ≥ 700.000 €	2025 CAPEX	2030 CAPEX ≥ 500.000 €
Wirtschaftlicher Rahmen	▶ Aktuell gibt es nur sehr wenig Wettbewerb hinsichtlich der Zulieferer und wenig Skaleneffekte. Dadurch werden vor allem die Tanksystem zu wesentlichen Kostentreibern des Fahrzeugs und liegen ca. 400.000 € oberhalb der Vergleichstechnologie. ▶ Aufgrund eines größeren Wettbewerbs der Zulieferer und von Skaleneffekten gehen die Hersteller von einer Kostenreduktion von ca. 30 % bis 2030 aus. ▶ Neben der CVD gibt es auch lokale Regelungen, die die Skaleneffekte weiter vorantreiben. So darf in den Niederlanden ab 2030 kein Müllsammelfahrzeug auf Basis eines Dieselmotors gekauft oder produziert werden. ▶ Konventionelle Dieselfahrzeuge werden sich in den kommenden Jahren ebenfalls deutlich verteuern, da neue Emissionsstandards eingehalten werden müssen. Hersteller gehen davon aus dass die Investitionskosten von aktuell ca. 250.000 € auf 400.000 € in 2030 steigen werden. ▶ Unter diesen Annahmen besteht in 2030 Kostenparität zwischen Brennstoffzellenbussen und konventionellen Dieselfahrzeugen und ab 2025 gehen die OEM davon aus, dass keine Förderung mehr nötig sein wird. ▶ In vertikal integrierten Projekten, in denen der H2 am MHKW selber produziert wird, können die H2 Gesteungskosten bei entsprechender Förderungen bereits heute den Referenzkosten von ca. 7,00 €/kg H2 entsprechen (siehe Beispiel Wuppertal).		

Durch Elektroantrieb können ggf. erweiterte Betriebszeiten erreicht werden.

2

Brennstoffzellen-Müllsammelfahrzeuge (VI/XI)

Wirtschaft- licher Rahmen

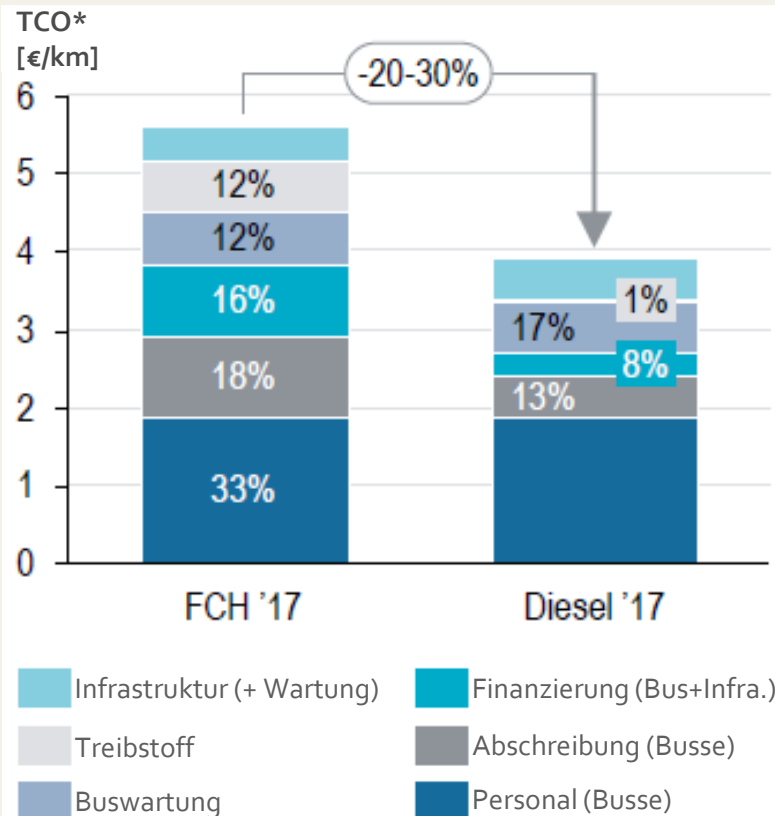
- ▶ Nach 32. BImSchV dürfen Müllsammelfahrzeuge nur in der Zeit von 07:00 Uhr bis 20:00 Uhr betrieben werden, was einen Mehrschichtbetrieb aktuell nicht zulässt. Ursächlich ist hierbei die Geräuschemission des Verbrennungsmotors.
- ▶ Aufgrund der Umstellung auf Elektromotor, ist die Hauptemissionsquelle nicht mehr der Motor selber sondern die Emission des Entleerungsvorgangs (z. B. Geklapper der Tonnen). Hier besteht noch großes Potential zur Geräuschminderung.
- ▶ Die OEM verstärken in diesem Bereich die Entwicklungsarbeit, da sie sich dadurch ggf. erweiterte Betriebszeiten erhoffen. In Italien, Spanien und Frankreich sind erweiterte Betriebszeiten bereits zum Teil realisiert und erlauben so auch einen 2 – 3 Schichtbetrieb.
- ▶ Über erweiterte Betriebszeiten wird ein höher Substitutionsfaktor zu konventionellen Fahrzeugen erreicht, so dass die Investitionskosten deutlich relativiert werden können.
- ▶ Forderung der OEM: Umlegen der Mehrkosten auf Gebühren pro Haushalt (ca. 10 ct pro Entleerung)

Die TCO liegen aktuell noch 20-30 %
oberhalb der Referenztechnologie.

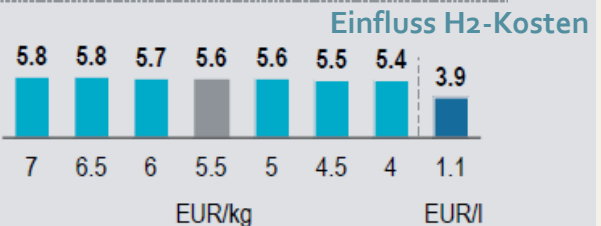
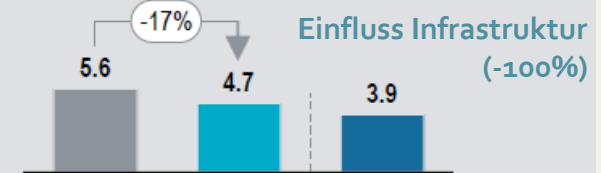
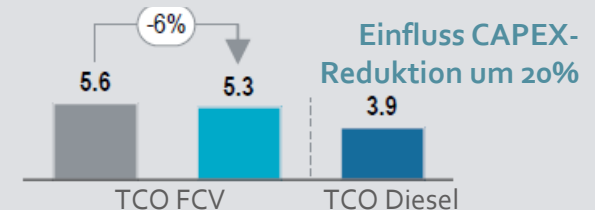
2

Brennstoffzellen-Müllsammelfahrzeuge (VII/XI)

Wirtschaft-
liche
Kenn-
zahlen
(Studie 1,
2017)



Erwarteter Einfluss auf die TCO [€/km]



* TCO: Total Cost of Ownership (Vollkostenbetrachtung)

In Europa kommen 24 BZ-Müllsammelfahrzeuge in den Testbetrieb.

2

Brennstoffzellen-Müllsammelfahrzeuge (VIII/XI)

Umsetzungsbeispiel



REVIVE - For clean and silent waste collection (2018 – 2021)

- ▶ Demonstration von 15 Fahrzeugen in 8 EU Städten
- ▶ Ziel: Technologieweiterentwicklung und Entwicklung von Betankungsprotokollen
- ▶ Budget ca. 5 Mio. €



HECTOR-Hydrogen Waste Collection Vehicles in North West (2019 – 2023)

- ▶ Demonstration von 7 Fahrzeugen in 7 EU Städten (Duisburg, Herten)
- ▶ Ziel: Technologiedemonstration und Betriebsoptimierung
- ▶ Budget ca. 5,57 Mio. €

HyTruck

- ▶ Demonstration von 2 Fahrzeugen in den Niederlanden
- ▶ Ziel: Technologiedemonstration
- ▶ Budget ?

Im Rahmen des NIP II sollen blad auch Müllsammelfahrzeuge gefördert werden.

2

Brennstoffzellen-Müllsammelfahrzeuge (IX/XI)

Förderung (I/II)



Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP II)

Bundes-Förderung: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur

- ▶ Zeitraum: 2016 bis 2026
- ▶ Förderbudget: 1,4 Mrd. € (für 10-Jahres-Zeitraum; ca. 60 % für die Marktaktivierung, 40 % für F&E für verschiedene Sektoren)
- ▶ Fördergegenstand:
 - „Investitionszuschüsse für: Fahrzeuge (Straße, Schiene und Wasser) und Flugzeuge, die mit einem Brennstoffzellenantrieb ausgestattet sind, und gegebenenfalls die für deren Betrieb notwendige Betankungs- und Wartungsinfrastruktur.. (...)“
 - Regierungsprogramm zur Fortsetzung des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie 2006 – 2016*
- ▶ Ablauf: Zur Antragseinreichung wird über einzelne befristete Calls aufgerufen, in denen die jeweiligen Förderschwerpunkte und die Rahmenbedingungen der Förderung präzisiert werden.
- ▶ Art der Zuwendung: nicht zurückzahlbarer Zuschuss; Kumulierungsverbot (für gleiche Kosten)
- ▶ Zuwendungshöhe: „Bemessungsgrundlage für Zuwendungen sind die zuwendungsfähigen projektbezogenen Ausgaben. Dies sind diejenigen Mehrausgaben, die durch den Einsatz der geförderten innovativen Technologie gegenüber dem Einsatz konventioneller Technologie bedingt sind. Gemäß Artikel 36 AGVO können die Investitionsmehrkosten mit bis zu 40 % bezuschusst werden. KMU können im Einzelfall höhere Beihilfeintensitäten gewährt werden. Bei PKW mit Brennstoffzellenantrieb (nach Nummer 2.1.1) erfolgt die Förderung ab einer näher im Aufruf zur Antragseinreichung festgelegten Mindeststückzahl.“

Das FCH Joint Undertaking koordiniert und fördert europaweite H2-Projekte.

2

Brennstoffzellen-Müllsammelfahrzeuge (X/XI)

Förderung (II/II)



Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU)

Privat-öffentliche Vereinigung aus Europäischer Kommission, Hydrogen Europe und Hydrogen Europe Research

- ▶ Mithilfe der Fördergelder aus den Programmen FP7 (Framework Programme for Research) und Horizon 2020 der Europäischen Kommission (als FCH 2 JU) werden Forschung, Demonstrations-Projekte und technologische Entwicklung mit Bezug zur Wasserstoff-Technologie gefördert.
- ▶ Für ausgeschriebene Projekte sind innerhalb von befristeten Calls die Anträge einzureichen. Die Projekt-Aufrufe müssen daher laufend sondiert werden hinsichtlich der Förderschwerpunkte und -summen (siehe auch <https://www.fch.europa.eu/page/call-2020>).

Vorteile der BZ-ASF sind kurze Tankzeiten und geringere Geräuschemissionen.



2

Brennstoffzellen-Müllsammelfahrzeuge (XI/XI)

Vergleich zu Alternativtechnologien

FCEV	BEV	ICV Diesel
Vorteile - Keine lokalen Emissionen - Keine Well-to-Wheel-Emissionen, wenn der Wasserstoff aus CO₂-freien Quellen bezogen wird (bspw. durch Elektrolyse-Strom aus Erneuerbaren Energien; siehe Steckbrief 3) - Kurze Betankungszeit (~ 15 min) - Hohe Reichweiten (bis zu 400 km) - Geringere Geräuschemissionen, ggf. neue Betriebsmodelle - Geringere Wartungskosten - Betrieb voller Schichten möglich - CVD konform Nachteile - Höhere Investitions- bzw. Anschaffungskosten - Fehlende Betankungsstandards - Aktuell nur zwei Anbieter am Markt.	Vorteile - Keine lokalen Emissionen - Keine Well-to-Wheel-Emissionen, wenn der Strom aus CO₂-freien Quellen / Erneuerbaren Energien bezogen wird - Geringere Infrastrukturkosten - Geringere Wartungskosten - CVD konform Nachteile - Geringere Reichweite: - Kein voller Schichtbetrieb möglich (max. 6 Stunden) - Vergleichsweise lange Ladezyklen - Wenige Anbieter am Markt	Vorteile - Bestehende Betankungsinfrastruktur - Flächendeckende Reparatur- und Wartungsexpertise - Hohe Reichweiten - Verfügbare Modelle in sämtlichen Segmenten Nachteile - Hohe lokale Emissionen - Höhere Geräuschbelastung - Sinkende gesellschaftliche und politische Akzeptanz - Keine mittelfristige Perspektive (s. CVD, Endlichkeit der Kraftstoffe) - Kraftstoffe Benzin und Diesel basieren heute zum Großteil (> 90 %) auf fossilen, endlichen Rohstoffen (Mineralöl) - Steigende Investitionskosten

Brennstoffzellen-SNF

Brennstoffzellen-SNF umfassen in diesem Steckbrief alle Fahrzeuge über 3,5 Tonnen.

3 Brennstoffzellen-SNF** (I/XI)	
Mögliche Einsatzbereiche in der Emscher-Lippe Region	
▸ Gelsendienste ▸ Kommunale Servicebetriebe Recklinghausen	
Kurzbeschreibung	
▸ In diesem Steckbrief werden Sattelzugmaschinen und LKW kombiniert betrachtet. Die Einteilung eines Fahrzeugs in die Kategorie SNF erfolgt normalerweise ab einem Gewicht von mehr als 12 Tonnen. Da jedoch in keiner Gewichtsklasse oberhalb von 3,5 Tonnen Modelle am Markt verfügbar sind, werden auch diese Fahrzeuge in diesem Steckbrief berücksichtigt. ▸ Brennstoffzellen-SNF nutzen gasförmigen Wasserstoff als Energieträger. Eine Brennstoffzelle wandelt an Bord unter Hinzugabe von Sauerstoff die chemische Energie des Wasserstoffs in elektrische Energie um. Diese wiederum wird in einem Elektromotor zum Antrieb genutzt. Daimler hat ein Konzept vorgestellt, bei dem der Wasserstoff flüssig im Fahrzeuge gespeichert wird. ▸ Brennstoffzellen-SNF sind lokal CO₂-frei und setzen keine Stickoxid- oder Partikelemissionen frei. Ihre einzige „Emission“ ist reines Wasser bzw. Wasserdampf. ▸ Der Tankvorgang erfolgt üblicherweise an stationären H₂-Tankstellen, an denen die Fahrzeuge bei 350 bar (in seltenen Fällen auch 700 bar) betankt werden. ▸ Bis heute sind noch keine Brennstoffzellen-SNF am Fahrzeugmarkt erhältlich.	
Wertschöpfungsstufe	
	Erzeugung
	Verteilung & Speicherung
	Nutzung
Muss-/Kann-Anwendung*	
2020	Muss ☐ Kann ☒ Clean Vehicles Directive
2025	Muss ☒ Kann ☐ Clean Vehicles Directive
2030	Muss ☒ Kann ☐ Clean Vehicles Directive

* in Bezug auf die Anschaffung von Fahrzeugen

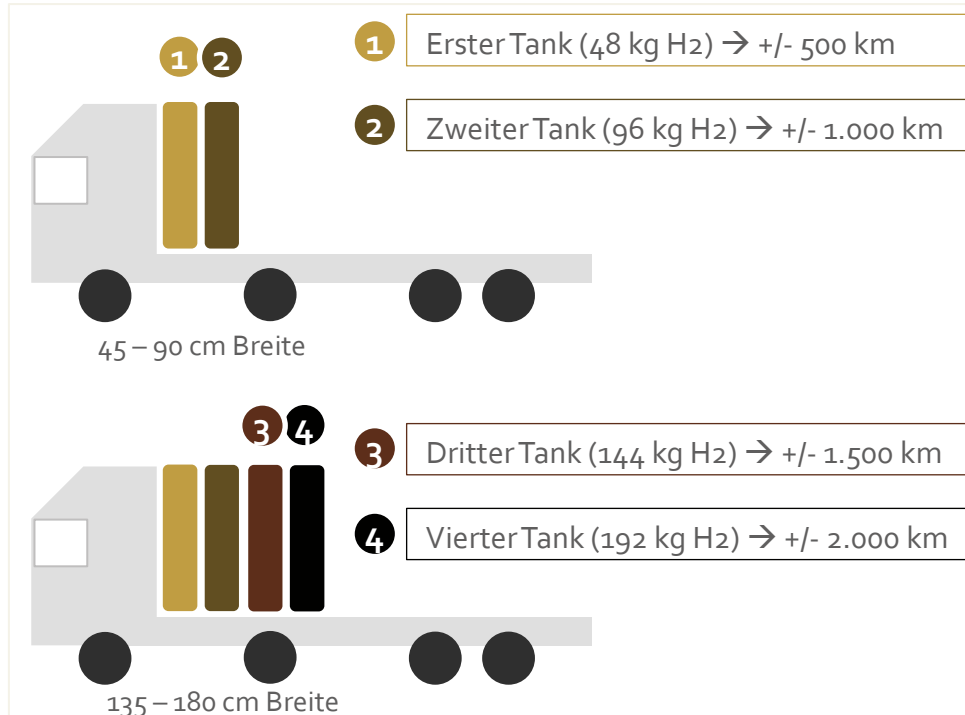
** SNF = Schweres Nutzfahrzeug

Die Angaben der Hersteller über Verbrauch und Reichweiten variieren noch stark.

3

Brennstoffzellen-SNF (II/XI)

Schematische Darstellung



Schematische Darstellung für den modularen Aufbau zur Erhöhung der Reichweite (Auf Basis von Hyzon Motors: <https://hyzonmotors.com/hydrogen/>)

Technische Kennzahlen BZ-SNF

Komponenten:

Brennstoffzelle, H₂-Tank, Batterie, Elektro-Antrieb

Reichweite:

600 – 800 km*

Druckstufe:

350 bis 700 bar (variiert je nach Konzept)

Tankinhalt:

Variiert stark (Nikola z.B. 60 kg H₂)*

Verbrauch:

7,5 – 15,7 kg H₂/100 km*

Betankungszeit:

< 15 min*

* Die Angaben beziehen sich auf theoretische Angaben der Hersteller, Angaben aus der Praxis liegen noch nicht vor. Darüber hinaus variieren sie zusätzlich über die unterschiedlichen LKW-Gewichtsklassen.

Stand heute sind keine SNF mit Brennstoffzelle am Markt verfügbar.

3 Brennstoffzellen-SNF (III/XI)															
Technology Readiness Level	Anbieter (Auszug) (i/ii)														
2020	Stand Juni 2020 gibt es keinen Anbieter, der ein schweres Brennstoffzellen-Nutzfahrzeug in Serienreife anbietet. Die folgenden Fahrzeuge sind entweder noch im Entwicklungsstadium oder Fahrzeuge im Testbetrieb. Nikola Motors (USA) Der US-Hersteller entwickelt zurzeit zusammen mit Bosch einen Brennstoffzellen-Antrieb. Die Produkt-Palette soll drei Fahrzeuge umfassen: Den Nikola One, den Nikola Two und den Nikola Tre. Für die ersten beiden Modelle wurden die unten stehenden Angaben von Nikola veröffentlicht. Die Fertigung soll im Iveco-Werk in Ulm ab 2023 erfolgen.														
2025	<table><tr><td>Status:</td><td>In der Entwicklung (Produktionsstart 2022)</td></tr><tr><td>Leistung:</td><td>Bis zu 1.000 PS</td></tr><tr><td>Reichweite:</td><td>800 – 1.200 km</td></tr><tr><td>Verbrauch:</td><td>-</td></tr><tr><td>Leergewicht:</td><td>8 – 9 t</td></tr><tr><td>Zul. Gesamtgewicht:</td><td>Ca. 36 t</td></tr><tr><td>Preis:</td><td>-</td></tr></table>	Status:	In der Entwicklung (Produktionsstart 2022)	Leistung:	Bis zu 1.000 PS	Reichweite:	800 – 1.200 km	Verbrauch:	-	Leergewicht:	8 – 9 t	Zul. Gesamtgewicht:	Ca. 36 t	Preis:	-
		Status:	In der Entwicklung (Produktionsstart 2022)												
		Leistung:	Bis zu 1.000 PS												
Reichweite:	800 – 1.200 km														
Verbrauch:	-														
Leergewicht:	8 – 9 t														
Zul. Gesamtgewicht:	Ca. 36 t														
Preis:	-														
2030															

<https://nikolamotor.com/one>

Erste vielversprechende Praxistests gibt es in den USA und Europa.



3

Brennstoffzellen-SNF (IV/XI)

Anbieter (Auszug) (ii/ii)

Hyundai Hydrogen Mobility (siehe dazu auch den Projekt-Steckbrief Nr. 11)

Status:	Der erste LKW wurde ausgeliefert.
Reichweite:	Ca. 400 km
Tankinhalt:	34,5 kg (volle Betankung in 7 Minuten)
Zul. Gesamtgewicht:	34 t



Mercedes-Benz Gen H2-Truck

Status:	Daimler hat den Prototypen im September 2020 vorgestellt und geht in die Erprobung.
Reichweite:	Bis zu 1.000 km
Besonderheit:	Der Wasserstoff wird flüssig im Fahrzeug gespeichert (bei -253 °C)
Verfügbarkeit:	Kundenerprobung wird für das Jahr 2023 geplant
Zuladung:	25 t

Toyota/Kenworth (Kombination eines Kenworth-Trucks mit der Antriebstechnik von Toyota)

Status:	Erprobung im Güterumschlag kalifornischer Häfen ab Ende 2019.
Reichweite:	> 480 km

Weitere Hersteller: VDL, Toyota/Hino Motors, Hyzon Motors, Honda/Isuzu, Quantron

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hyundai_Xcient_Fuel_Cell.jpg

Die meisten öffentlichen H2-Tankstellen bieten nur die Druckstufe 700 bar an.

3

Brennstoffzellen-SNF (V/ XI)

Investition
und
Betrieb

2020

CAPEX

-

2025

CAPEX

-

2030

CAPEX

-

Wirtschaft-
licher
Rahmen

- ▶ Stand heute gibt es erste Entwicklungs- und Testfahrzeuge, sodass keine Preise für Investition und laufende Kosten für schwere Nutzfahrzeuge mit Brennstoffzelle vorliegen. Auf Basis der Informationen der Steckbriefe zu anderen Mobilitäts-Anwendungen lässt sich jedoch ableiten, dass die Investitionskosten kurzfristig deutlich höher liegen als bei Fahrzeugen mit konventionellem Antrieb. Durch den Markthochlauf und höhere Absatzzahlen werden die Kosten sinken.
- ▶ Das öffentlich zugängliche Netz für Wasserstoff-Tankstellen mit einer Druckstufe von 350 bar ist vergleichsweise sehr gering ausgebaut, da H2 Mobility lange den Fokus auf den Ausbau einer Wasserstoff-Infrastruktur für PKW gelegt hat. Eine aktuelle Liste der Wasserstoff-Tankstellen in Deutschland, die die Druckstufe von 350 bar anbieten, ist unter <https://h2.live/> abrufbar.
 - ▶ Für den Fall, dass ein Elektrolyseur und/oder eine Wasserstoff-Tankstelle für einen bereits bestehenden Eigenverbrauch (bspw. Busse) installiert werden, können die SNF dort betankt werden.
- ▶ Der derzeitige Wasserstoff-Preis an öffentlichen Tankstellen beträgt 9,50 € / kg Wasserstoff.
- ▶ Laut Aussage der OEM liegt der Fokus der schnellen, breiten Marktverfügbarkeit zunächst bei LNF und SNF (Mitte der 2020er Jahre).

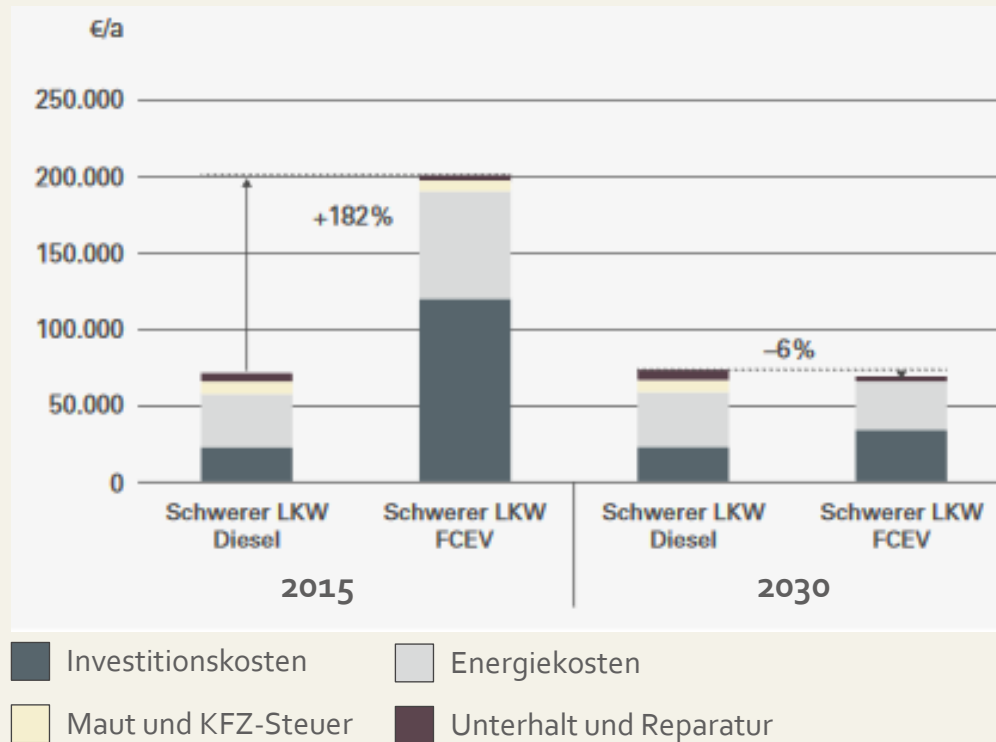
Mit steigenden Absatzzahlen ist mit einem Rückgang der Investitionskosten zu rechnen.

3

Brennstoffzellen-SNF (VI/XI)

Wirtschaft-
liche
Kenn-
zahlen
(Studie 1,
2015)

TCO¹-Betrachtung für schwere SNF (18 t zGG²)



Annahmen

Investitionskosten:

- ▶ Heute (2015): ca. 470.000 €
- ▶ 2030: 125.000 € (30 % mehr als das Diesel-Äquivalent)

Kraftstoffkosten:

- ▶ Bis 2030 wird angenommen, dass die Energiekosten um 15 % geringer sind

Nutzungsdauer:

- ▶ 4,2 Jahre

¹ TCO: Total Cost of Ownership (Vollkostenbetrachtung)

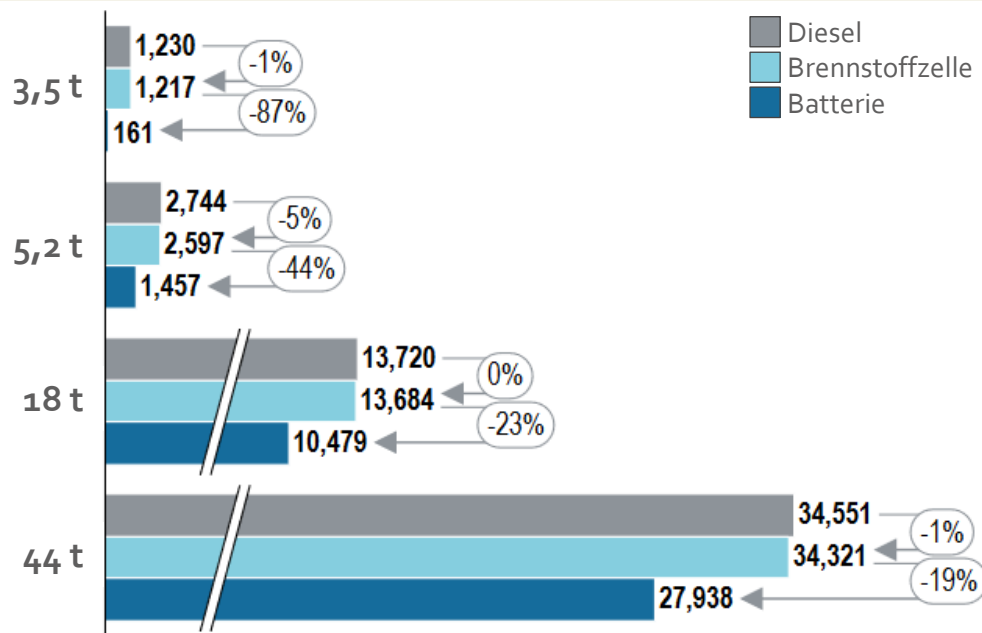
² zulässiges Gesamtgewicht

Die Nutzlast des Brennstoffzellen-SNF ist höher als bei batteriebetriebenen SNF.

3

Brennstoffzellen-SNF (VII/XI)

Vorhandene Nutzlast für verschiedene Antriebstechnologien und Fahrzeugklassen



Annahmen

- Nutzlast angenommen für eine Fahrzeug-Reichweite von 800 km

Wirtschaft-
liche
Kenn-
zahlen
(Studie 2,
Herbst
2017)

- Die oben stehende Grafik verdeutlicht den Unterschied des Einsatzes der Brennstoffzelle ggü. dem Antrieb mit Batterie. Durch das hohe Gewicht, einer bezogen auf die Leistung äquivalenten Batterie, verringert sich die vorhandene Nutzlast in allen LKW-Klassen deutlich. Mit steigendem Fahrzeug-Gewicht nimmt die Differenz ab.

Sowohl in Europa als auch den USA gibt es erste Demoprojekte.

3

Brennstoffzellen-SNF (VIII/XI)

Umsetzungsbeispiel



- ▶ In dem von der EU finanzierten Projekt, 'Hydrogen Solutions for Heavy-duty transport Aimed at Reduction of Emissions in North-West Europe' wird ein 27-Tonnen-LKW mit Brennstoffzelle und einer mobilen Wasserstofftankstelle an insgesamt sechs Stationen in Deutschland, den Niederlanden, Belgien und Frankreich getestet (vgl. Folie IV).
- ▶ Das Projekt hat ein Budget von 3,52 Mio. €, von denen 1,69 Mio. € durch die EU gefördert werden.



- ▶ In dem Projekt 'H2Haul' sollen drei neue Typen von Brennstoffzellen-LKW bis zur 44-Tonnen-Klasse entwickelt und 16 Fahrzeuge im Praxiseinsatz getestet werden.
- ▶ Das Projekt wird von Element Energy koordiniert, vom FCH JU mit 12 Mio. € bezuschusst und läuft ab 2019 für fünf Jahre.



- ▶ In dem „Project Portal“ erproben Kenworth und Toyota in den kalifornischen Häfen Long Beach und Los Angeles Brennstoffzellen-SNF, die seit 2017 bereits 22.500 Testkilometer zurückgelegt haben.
- ▶ Die Basis bildet ein Kenworth-Truck, der mit Brennstoffzellen aus dem Toyota Mirai ausgerüstet ist.

Das NIP II fördert die Anschaffung von Fahrzeugen mit Brennstoffzellenantrieb.

3

Brennstoffzellen-SNF (IX/XI)

Förderung (I/II)



Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP II)

Bundes-Förderung: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur

- ▶ Zeitraum: 2016 bis 2026
- ▶ Förderbudget: 1,4 Mrd. € (für 10-Jahres-Zeitraum; ca. 60 % für die Marktaktivierung, 40 % für F&E für verschiedene Sektoren)
- ▶ Fördergegenstand:
 - „Investitionszuschüsse für: Fahrzeuge (Straße, Schiene und Wasser) und Flugzeuge, die mit einem Brennstoffzellenantrieb ausgestattet sind, und gegebenenfalls die für deren Betrieb notwendige Betankungs- und Wartungsinfrastruktur.. (...)“
 - Regierungsprogramm zur Fortsetzung des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie 2006 – 2016*
- ▶ Ablauf: Zur Antragseinreichung wird über einzelne befristete Calls aufgerufen, in denen die jeweiligen Förderschwerpunkte und die Rahmenbedingungen der Förderung präzisiert werden.
- ▶ Art der Zuwendung: nicht zurückzahlbarer Zuschuss; Kumulierungsverbot (für gleiche Kosten)
- ▶ Zuwendungshöhe: „Bemessungsgrundlage für Zuwendungen sind die zuwendungsfähigen projektbezogenen Ausgaben. Dies sind diejenigen Mehrausgaben, die durch den Einsatz der geförderten innovativen Technologie gegenüber dem Einsatz konventioneller Technologie bedingt sind. Gemäß Artikel 36 AGVO können die Investitionsmehrkosten mit bis zu 40 % bezuschusst werden. KMU können im Einzelfall höhere Beihilfeintensitäten gewährt werden. Bei PKW mit Brennstoffzellenantrieb (nach Nummer 2.1.1) erfolgt die Förderung ab einer näher im Aufruf zur Antragseinreichung festgelegten Mindeststückzahl.“

Das FCH Joint Undertaking koordiniert und fördert europaweite H2-Projekte.

3

Brennstoffzellen-SNF (X/XI)

Förderung (II/II)



Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU)

Privat-öffentliche Vereinigung aus Europäischer Kommission, Hydrogen Europe und Hydrogen Europe Research

- ▶ Mithilfe der Fördergelder aus den Programmen FP7 (Framework Programme for Research) und Horizon 2020 der Europäischen Kommission (als FCH 2 JU) werden Forschung, Demonstrations-Projekte und technologische Entwicklung mit Bezug zur Wasserstoff-Technologie gefördert.
- ▶ Für ausgeschriebene Projekte sind innerhalb von befristeten Calls die Anträge einzureichen. Die Projekt-Aufrufe müssen daher laufend hinsichtlich der Förderschwerpunkte und -summen sondiert werden (siehe auch <https://www.fch.europa.eu/page/call-2020>).

Vorteile der BZ-SNF sind die hohe Nutzlast, hohe Reichweiten und kurze Betankungszeiten.

3

Brennstoffzellen-SNF (XI/XI)

Vergleich zu Alternativtechnologien

SNF mit Brennstoffzelle	SNF mit Batterie	SNF mit Diesel-Verbrenner
Vorteile - Keine lokalen Emissionen - Keine Well-to-Wheel-Emissionen, wenn der Wasserstoff aus CO₂-freien Quellen bezogen wird (bspw. durch Elektrolyse-Strom aus Erneuerbaren Energien; siehe Steckbrief 3) - Kurze Betankungszeit (< 15 min) - Hohe Reichweiten (theoretisch über 1.000 km möglich) - Höhere Nutzlast ggü. Batterie (vgl. Folie VII) Nachteile - Kurz- bis mittelfristig höhere Investitionskosten - Stand heute gering ausgebautes Tankstellen-Netz - Stand heute keine Modelle am Markt verfügbar	Vorteile - Keine lokalen Emissionen - Keine Well-to-Wheel-Emissionen, wenn der Strom aus CO₂-freien Quellen / Erneuerbaren Energien bezogen wird - Stark wachsende Ladesäulen-Infrastruktur - Ladesäulen sind flexibel aufstellbar (Zuhause / an der Arbeitsstelle) Nachteile - Geringere Reichweiten - Vergleichsweise lange Ladezyklen - Stand heute keine Modelle am Markt verfügbar - Hohe, notwendige Batteriegewichte und dadurch verringerte Nutzlast (vgl. Folie VII)	Vorteile - Flächendeckendes, ausgebautes Tankstellennetz - Flächendeckende Reparatur- und Wartungsexpertise - Hohe Reichweiten (über 1.000 km) - Verfügbare Modelle in sämtlichen Modell- und Preisklassen Nachteile - Hohe lokale Emissionen - Höhere Geräuschbelastung - Sinkende gesellschaftliche und politische Akzeptanz - Keine mittelfristige Perspektive (s. Clean Vehicles Directive, Endlichkeit der Kraftstoffe) - Kraftstoffe Benzin und Diesel basieren heute zum Großteil (> 90 %) auf fossilen, endlichen Rohstoffen (Mineralöl)

Brennstoffzellen-LNF

Brennstoffzellen-LNF umfassen in diesem Steckbrief Fahrzeuge unter 3,5 Tonnen.

4	Brennstoffzellen-LNF** (I/X)			
Mögliche Einsatzbereiche in der Emscher-Lippe Region				Wertschöpfungsstufe
▸ Gelsendienste ▸ Kommunale Servicebetriebe Recklinghausen		▸ Kommunen / Kommunale Unternehmen		 Erzeugung  Verteilung & Speicherung  Nutzung
Kurzbeschreibung				Muss-/Kann-Anwendung*
▸ In diesem Steckbrief werden Nutzfahrzeuge bis 3,5 Tonnen zusammengefasst. Dies beinhaltet kleinere LKW sowie Transporter- und Sprinter-Klassen. ▸ Brennstoffzellen-LNF nutzen gasförmigen Wasserstoff als Energieträger. Eine Brennstoffzelle wandelt an Bord unter Hinzugabe von Sauerstoff die chemische Energie des Wasserstoffs in elektrische Energie um. Diese wiederum wird in einem Elektromotor zum Antrieb genutzt. ▸ Brennstoffzellen-LNF sind lokal CO₂-frei und setzen keine Stickoxid- oder Partikelemissionen frei. Ihre einzige „Emission“ ist reines Wasser bzw. Wasserdampf. ▸ Der Tankvorgang erfolgt üblicherweise an stationären H₂-Tankstellen, an denen die Fahrzeuge bei 350 oder 700 bar (je nach Modell) betankt werden. ▸ Bis heute sind noch keine Brennstoffzellen-LNF am Fahrzeugmarkt erhältlich. Es gibt erste Testprojekte bzw. Prototypen und zahlreiche Unternehmen entwickeln Fahrzeuge. ▸ Nach Aussagen unterschiedlicher Automobil-Hersteller wird der Fokus inzwischen nicht mehr auf die schnelle Marktreife von PKW, sondern zunächst von LNF und SNF gelegt.				2020 Muss ☐ Kann ☒ Clean Vehicles Directive
				2025 Muss ☒ Kann ☐ Clean Vehicles Directive
				2030 Muss ☒ Kann ☐ Clean Vehicles Directive

* in Bezug auf die Anschaffung von Fahrzeugen

** LNF = Leichtes Nutzfahrzeug

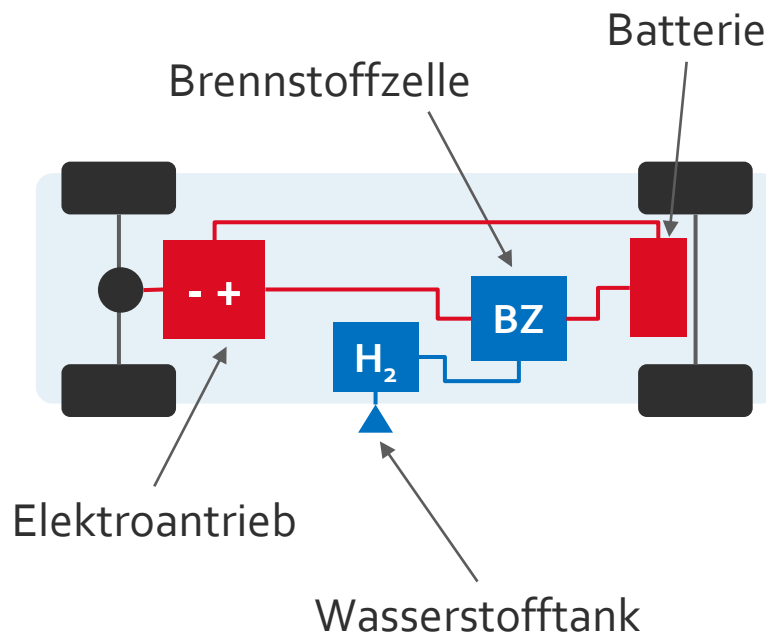
42 Stand der Erarbeitung: Januar 2021

Die technischen Kennzahlen variieren über die verschiedenen Fahrzeugklassen stark.

4

Brennstoffzellen-LNF (II/X)

Schematische Darstellung



Technische Kennzahlen BZ-LNF

Komponenten:

Brennstoffzelle, H₂-Tank, Batterie, Elektro-Antrieb (Aufbau ähnelt dem von Brennstoffzellen-PKW)

Reichweite:

385 – 700 km

Druckstufe:

350 bis 700 bar (variiert je nach Konzept)

Betankungszeit:

Ca. 3 – 5 min

Auf Basis von: <https://www.bmw.com/de/innovation/so-funktionieren-wasserstoffautos.html>

* Die Angaben beziehen sich auf theoretische Angaben, Angaben aus der Praxis liegen noch nicht vor. Darüber hinaus variieren sie zusätzlich über die unterschiedlichen Fahrzeug-Gewichtsklassen.

Renault möchte BZ-LNF auf den Markt bringen.

4

Brennstoffzellen-LNF (III/X)

Technology Readiness Level

2020

F & E

Kleinserie

☐

Serienreife

☐

2025

F & E

☐

Kleinserie

Serienreife

☐

2030

F & E

☐

Kleinserie

☐

Serienreife

Anbieter (Auszug) (i/ii)

Stand Januar 2021 gibt es keinen Anbieter, der ein leichtes Brennstoffzellen-Nutzfahrzeug in Serienreife anbietet. Renault kündigte Ende des Jahres 2019 den Marktstart von zwei BZ-Modellen an, verfügbar sind sie mit Stand Januar 2021 in Deutschland nicht.

Renault Kangoo Z.E. Hydrogen und Master Z.E. Hydrogen

Der französische Hersteller erweitert seine Produktpalette bei den Nutzfahrzeugen Kangoo und Master um Brennstoffzellen. Diese fungieren jedoch nicht als Hauptantrieb sondern dienen als Range Extender für den Hauptantrieb per Batterie. Das System ist in Kooperation mit Symbio Fcell entwickelt worden. Seit 2015 sind bereits erste Fahrzeuge in Frankreich (und Deutschland) unterwegs.

	Kangoo Z.E. Hydrogen	Master Z.E. Hydrogen
Status:	In der Entwicklung	
Reichweite:	370 (statt 230 km nur mit Batterie)	350 (statt 120 km nur mit Batterie)
Druckstufe des H2:	350 oder 700 bar	700 bar
Nutzlast:	540 kg	1.200 kg
Preis:	48.300 € (franz. Markt Stand 2019)	k.A.

<https://easyelectriclife.groupe.renault.com/de/ausblick/markt/auto-wasserstoff-kangoo-ze-master-ze/>

Darüber hinaus gibt es lediglich Studien und Demoprojekte.



Zurück zum
Inhaltsverzeichnis

4

Brennstoffzellen-LNF (IV/X)

Anbieter (Auszug) (ii/ii)

Hyzon Motors

Status:	In der Entwicklung
Reichweite:	bis 800 km
Leistungsstufen:	60, 80 und 100 kW

Stellantis

Modelle	Opel Vivaro e-Hydrogen, Citroen Jumpy, Peugeot Expert
Technologie:	Brennstoffzelle in Kombination mit Batterie
Status:	In der Entwicklung (Markteinführung geplant für Ende 2021)
Druckstufe:	700 bar
Reichweite:	> 400 Kilometer

<https://www.hyzonmotors.com/products>

<https://www.auto-motor-und-sport.de/tech-zukunft/alternative-antriebe/stellantis-brennstoffzellen-transporter-hydrogen-fcv-opel-vivaro-jumpy-expert/>

Da keine Modelle am Markt verfügbar sind,
ist keine wirtsch. Bewertung möglich.

4	Brennstoffzellen-LNF (V/X)		
Investition und Betrieb	2020 CAPEX 48.300 €	2025 CAPEX -	2030 CAPEX -
Wirtschaft- licher Rahmen	▶ Stand heute gibt es erste Kleinserien- und Testfahrzeuge, sodass nur wenige Preise für Investition und laufende Kosten für leichte Nutzfahrzeuge mit Brennstoffzelle vorliegen. Der Preis des batteriebetriebenen Kangoo Z.E. beträgt in Deutschland bspw. 20.820 Euro. Er kostet damit weniger als die Hälfte des entsprechenden Brennstoffzellen-Modells. Durch den Markthochlauf und höhere Absatzzahlen werden die Kosten sinken. ▶ Das öffentlich zugängliche Netz für Wasserstoff-Tankstellen ist noch vergleichsweise gering ausgebaut und bei der Anschaffungsplanung zu berücksichtigen (verglichen mit den Tankstellen-Netzen für Verbrenner und den Ladesäulen-Netzen für Batterie-Fahrzeuge). Dies gilt insbesondere für Tankstellen, die über eine Druckstufe von 350 bar verfügen, da H2 Mobility lange den Fokus auf den Ausbau einer Wasserstoff-Infrastruktur für PKW gelegt hat. Eine aktuelle Liste der Wasserstoff-Tankstellen in Deutschland ist unter https://h2.live/ abrufbar. ▶ Für den Fall, dass ein Elektrolyseur und/oder eine Wasserstoff-Tankstelle für einen bereits bestehenden Eigenverbrauch (bspw. Busse) installiert werden, können die Fahrzeuge dort betankt werden. ▶ Der derzeitige Wasserstoff-Preis an öffentlichen Tankstellen beträgt 9,50 € / kg Wasserstoff. ▶ Laut Aussage der OEM liegt der Fokus der schnellen, breiten Marktverfügbarkeit zunächst bei LNF und SNF (Mitte der 2020er Jahre).		

Die Brennstoffzelle hat mittelfristig Vorteile bei den Betriebs- und Kraftstoffkosten.

4

Brennstoffzellen-LNF (VI/X)



¹ TCO: Total Cost of Ownership (Vollkostenbetrachtung)

Sowohl in Europa als auch den USA gibt es erste Demoprojekte.

4

Brennstoffzellen-LNF (VII/X)

Umsetzungsbeispiel



- ▶ In den durch das FCH JU 2 geförderten Projekten HME und H2ME wurden Stand November 2018 über 900 Renault Kangoo Z.E. Hydrogen erfolgreich eingesetzt, die mit einer Brennstoffzelle als Range Extender ausgestattet sind und die Basis für das in diesem Jahr erscheinende Serienfahrzeug darstellen.
- ▶ <https://h2me.eu/>



- ▶ In dem Projekt ‚Fuel Cell Hybrid Electric Delivery Van Project‘ (2014 – 2022) des US-amerikanischen Ministeriums für Energie werden Delivery Vans der Firma UPS auf ein Brennstoffzellen-Batterie-Hybrid-System umgerüstet und im regulären Betrieb getestet. Die erhobenen Daten werden analysiert, um Erkenntnisse zu Performance und Konkurrenzfähigkeit zu anderen Antrieben zu gewinnen.

Das NIP II fördert die Anschaffung von Fahrzeugen mit Brennstoffzellenantrieb.

4

Brennstoffzellen-LNF (VIII/X)

Förderung (II/II)



Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP II)

Bundes-Förderung: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur

- ▶ Zeitraum: 2016 bis 2026
- ▶ Förderbudget: 1,4 Mrd. € (für 10-Jahres-Zeitraum; ca. 60 % für die Marktaktivierung, 40 % für F&E für verschiedene Sektoren)
- ▶ Fördergegenstand:
 - „Investitionszuschüsse für: Fahrzeuge (Straße, Schiene und Wasser) und Flugzeuge, die mit einem Brennstoffzellenantrieb ausgestattet sind, und gegebenenfalls die für deren Betrieb notwendige Betankungs- und Wartungsinfrastruktur.. (...)“
 - Regierungsprogramm zur Fortsetzung des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie 2006 – 2016*
- ▶ Ablauf: Zur Antragseinreichung wird über einzelne befristete Calls aufgerufen, in denen die jeweiligen Förderschwerpunkte und die Rahmenbedingungen der Förderung präzisiert werden.
- ▶ Art der Zuwendung: nicht zurückzahlbarer Zuschuss; Kumulierungsverbot (für gleiche Kosten)
- ▶ Zuwendungshöhe: „Bemessungsgrundlage für Zuwendungen sind die zuwendungsfähigen projektbezogenen Ausgaben. Dies sind diejenigen Mehrausgaben, die durch den Einsatz der geförderten innovativen Technologie gegenüber dem Einsatz konventioneller Technologie bedingt sind. Gemäß Artikel 36 AGVO können die Investitionsmehrkosten mit bis zu 40 % bezuschusst werden. KMU können im Einzelfall höhere Beihilfeintensitäten gewährt werden. Bei PKW mit Brennstoffzellenantrieb (nach Nummer 2.1.1) erfolgt die Förderung ab einer näher im Aufruf zur Antragseinreichung festgelegten Mindeststückzahl.“

Das FCH Joint Undertaking koordiniert und fördert europaweite H2-Projekte.



Zurück zum
Inhaltsverzeichnis

4

Brennstoffzellen-LNF (IX/X)

Förderung (II/II)



Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU)

Privat-öffentliche Vereinigung aus Europäischer Kommission, Hydrogen Europe und Hydrogen Europe Research

- ▶ Mithilfe der Fördergelder aus den Programmen FP7 (Framework Programme for Research) und Horizon 2020 der Europäischen Kommission (als FCH 2 JU) werden Forschung, Demonstrations-Projekte und technologische Entwicklung mit Bezug zur Wasserstoff-Technologie gefördert.
- ▶ Für ausgeschriebene Projekte sind innerhalb von befristeten Calls die Anträge einzureichen. Die Projekt-Aufrufe müssen daher laufend hinsichtlich der Förderschwerpunkte und -summen sondiert werden (siehe auch <https://www.fch.europa.eu/page/call-2020>).

Die Vorteile der BZ-LNF sind die hohen Reichweiten und kurze Betankungszeiten.

4

Brennstoffzellen-LNF (X/X)

Vergleich zu Alternativtechnologien

LNF mit Brennstoffzelle

Vorteile

- ▶ Keine lokalen Emissionen
- ▶ Keine Well-to-Wheel-Emissionen, wenn der Wasserstoff aus CO₂-freien Quellen bezogen wird (bspw. durch Elektrolyse-Strom aus Erneuerbaren Energien; siehe Steckbrief 3)
- ▶ Kurze Betankungszeit (< 10 min)
- ▶ Hohe Reichweiten (theoretisch über 1.000 km möglich)
- ▶ Höhere Nutzlast ggü. Batterie

Nachteile

- ▶ Kurz- bis mittelfristig höhere Investitionskosten
- ▶ Stand heute gering ausgebautes Tankstellen-Netz
- ▶ Stand heute keine Modelle am Markt verfügbar

LNF mit Batterie

Vorteile

- ▶ Keine lokalen Emissionen
- ▶ Keine Well-to-Wheel-Emissionen, wenn der Strom aus CO₂-freien Quellen / Erneuerbaren Energien bezogen wird
- ▶ Stark wachsende Ladesäulen-Infrastruktur
- ▶ Ladesäulen sind flexibel aufstellbar (Zuhause / im Unternehmen)
- ▶ Erste Modelle am Markt verfügbar (bspw. Renault Kangoo/Master Z.E.)

Nachteile

- ▶ Geringere Reichweiten
- ▶ Vergleichsweise lange Ladezyklen

LNF mit Diesel-Verbrenner

Vorteile

- ▶ Flächendeckendes, ausgebautes Tankstellennetz
- ▶ Flächendeckende Reparatur- und Wartungsexpertise
- ▶ Hohe Reichweiten (über 1.000 km)
- ▶ Verfügbare Modelle in sämtlichen Modell- und Preisklassen

Nachteile

- ▶ Hohe lokale Emissionen
- ▶ Höhere Geräuschbelastung
- ▶ Sinkende gesellschaftliche und politische Akzeptanz
- ▶ Keine mittelfristige Perspektive (s. Clean Vehicles Directive, Endlichkeit der Kraftstoffe)
- ▶ Kraftstoffe Benzin und Diesel basieren heute zum Großteil (> 90 %) auf fossilen, endlichen Rohstoffen (Mineralöl)

5

Brennstoffzellen-PKW

Brennstoffzellen-PKW sind erst in kleinen Stückzahlen auf Deutschlands Straßen.



Zurück zum
Inhaltsverzeichnis

5

Brennstoffzellen-PKW (I/XII)

Mögliche Einsatzbereiche in der Emscher-Lippe Region

- ▶ Kommunen, Kommunale Unternehmen/ Einrichtungen
- ▶ BRABUS
- ▶ Taxi-Unternehmen

Kurzbeschreibung

- ▶ Brennstoffzellen-PKW (auch FCEV**) nutzen gasförmigen Wasserstoff als Energieträger. Eine Brennstoffzelle wandelt an Bord unter Hinzugabe von Sauerstoff die chemische Energie des Wasserstoffs in elektrische Energie um. Diese wiederum wird in einem Elektromotor zum Antrieb genutzt.
- ▶ FCEV sind lokal CO₂-frei und setzen keine Stickoxid- oder Partikelemissionen frei. Ihre einzige „Emission“ ist reines Wasser bzw. Wasserdampf.
- ▶ Der Tankvorgang erfolgt üblicherweise an stationären H₂-Tankstellen, an denen die Fahrzeuge bei 700 bar betankt werden.
- ▶ Derzeit sind in Deutschland ca. 808 FCEV zugelassen (Stand 09/2019).
- ▶ In den am Markt verfügbaren Fahrzeugen kommen nahezu ausschließlich PEM-Brennstoffzellen zum Einsatz.
- ▶ Viele Hersteller fokussieren sich in ihrer Modellpolitik auf den Einsatz der Brennstoffzelle in schwereren Fahrzeugklassen.

Wertschöpfungsstufe



Erzeugung



Verteilung & Speicherung



Nutzung

Muss-/Kann-Anwendung+

2020	Muss	☐	Clean Vehicles Directive
	Kann	☒	
2025	Muss	☐	Clean Vehicles Directive
	Kann	☒	
2030	Muss	☐	Clean Vehicles Directive
	Kann	☒	

* in Bezug auf die Anschaffung von Fahrzeugen

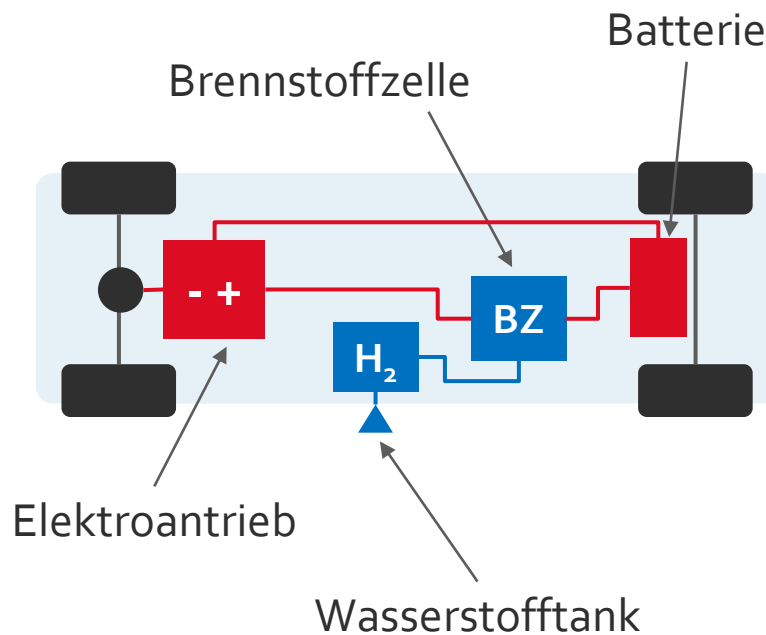
** FCEV = Fuel cell electric vehicle / PKW mit Brennstoffzelle und Elektromotor

Die Brennstoffzelle erzeugt Strom, der über einen Elektromotor Vortrieb generiert.

9

Brennstoffzellen-PKW (II/XII)

Schematische Darstellung



Technische Kennzahlen FCEV

Komponenten:

Brennstoffzelle, H₂-Tank, Batterie, Elektro-Antrieb

Reichweite:

500 – 750 km

Druckstufe:

700 bar

Tankinhalt:

5 – 6,5 kg

Verbrauch:

~0,7 – 1,01 kg H₂/100 km

Betankungszeit:

ca. 3 min (1,5 kg/min)

Die Verfügbarkeit von FCEV ist vergleichsweise eingeschränkt.

5		Brennstoffzellen-PKW (III/XII)															
Technology Readiness Level		Anbieter (Auszug) (i/ii)															
2020	 F & E ☐	Mercedes-Benz GLC F-Cell Der Antrieb des GLC F-Cell kombiniert eine Brennstoffzelle mit einer Lithium-Ionen-Batterie, ist also ein Plugin-Hybrid. Dadurch lassen sich vier verschiedene Fahrmodi auswählen, die je nach Bedarf das Zusammenspiel von Energie aus Brennstoffzelle und Batterie unterschiedlich regeln. So reicht bspw. im innerstädtischen Betrieb der reine Batterie-Antrieb. Bei Bremsvorgängen wird die Batterie durch Rekuperation geladen.															
	 Kleinserie ☒																
	 Serienreife ☐																
2025	 F & E ☐	Daimler hat die Produktion nach 3.000 produzierten Fahrzeugen eingestellt. Der Fokus soll zukünftig weniger auf dem Einsatz der Brennstoffzelle in PKW als vielmehr im Schwerlastverkehr liegen.															
	 Kleinserie ☒																
	 Serienreife ☐																
2030	 F & E ☐	<table><tr><td>Antrieb:</td><td>Brennstoffzelle mit einer Plugin Lithium-Ionen-Batterie</td></tr><tr><td>Leistung:</td><td>155 kW / 210 PS</td></tr><tr><td>Reichweite:</td><td>478 km (30 – 51 km rein mit der Energie der Lithium-Ionen Batterie)</td></tr><tr><td>Tankinhalt:</td><td>4,4 kg H₂</td></tr><tr><td>Verbrauch:</td><td>1,1 kg / 100 km (0,34 kg H₂ / 100 km laut H₂ Mobility)</td></tr><tr><td>Preis:</td><td>War nur als Full-Service-Mietmodell an sieben deutschen Standorten für einige hundert Kunden verfügbar (799 €/Monat)</td></tr><tr><td>Gewicht:</td><td>2.150 kg</td></tr></table>	Antrieb:	Brennstoffzelle mit einer Plugin Lithium-Ionen-Batterie	Leistung:	155 kW / 210 PS	Reichweite:	478 km (30 – 51 km rein mit der Energie der Lithium-Ionen Batterie)	Tankinhalt:	4,4 kg H ₂	Verbrauch:	1,1 kg / 100 km (0,34 kg H ₂ / 100 km laut H ₂ Mobility)	Preis:	War nur als Full-Service-Mietmodell an sieben deutschen Standorten für einige hundert Kunden verfügbar (799 €/Monat)	Gewicht:	2.150 kg	
	Antrieb:		Brennstoffzelle mit einer Plugin Lithium-Ionen-Batterie														
	Leistung:		155 kW / 210 PS														
Reichweite:	478 km (30 – 51 km rein mit der Energie der Lithium-Ionen Batterie)																
Tankinhalt:	4,4 kg H ₂																
Verbrauch:	1,1 kg / 100 km (0,34 kg H ₂ / 100 km laut H ₂ Mobility)																
Preis:	War nur als Full-Service-Mietmodell an sieben deutschen Standorten für einige hundert Kunden verfügbar (799 €/Monat)																
Gewicht:	2.150 kg																
 Kleinserie ☐																	
 Serienreife ☒																	



[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mercedes_GLC_F-Cell,_IAA_2017,_Frankfurt_\(1Y7A3411\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mercedes_GLC_F-Cell,_IAA_2017,_Frankfurt_(1Y7A3411).jpg)

Serienreife Modelle gibt es vor allem von asiatischen Herstellern.

5

Brennstoffzellen-PKW (IV/XII)

Anbieter (Auszug) (ii/ii)

Hyundai NEXO

Antrieb:	Brennstoffzelle
Leistung:	120 kW / 163 PS
Reichweite:	756 km
Tankinhalt:	6,33 kg H ₂
Verbrauch:	0,84 kg H ₂ / 100 km (Testverbrauch laut Auto Motor Sport 1,2 kg H ₂ / 100 km)
Preis:	69.000 €



Toyota MIRAI (2. Generation)

Antrieb:	Brennstoffzelle
Leistung:	134 kW / 182 PS
Reichweite:	650 km
Tankinhalt:	5,6 kg H ₂
Preis:	63.900 €



Weitere Hersteller: Honda (Clarity Fuel Cell – nur in Japan und Kalifornien erhältlich), Hyundai ix35 Fuel Cell (gebaut bis 2018)

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Toyota_MIRAI_Z_\(JPD20\)_with_the_factory-installed_option.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Toyota_MIRAI_Z_(JPD20)_with_the_factory-installed_option.jpg)

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:DSC06147-Hyundai_Nexo.jpg

56 Stand der Erarbeitung: Januar 2021

Skaleneffekte und zunehmende Technologiereife versprechen Kostensenkungen.

5

Brennstoffzellen-PKW (V/ XII)

Investition und Betrieb	2020	2025	2030
Wirtschaft- licher Rahmen	CAPEX ≥ 70.000 €	CAPEX -	CAPEX ~ 35.000 €
	▶ Stand heute sind die Investitions- bzw. Anschaffungskosten eines FCEV der dominierende Kostenfaktor, da die Preise noch deutlich über denen vergleichbarer Fahrzeuge mit Verbrennungs- oder Hybridmotorisierung liegen. Steigt der Reifegrad und die Absatzzahlen, ist mit einer Verringerung der Preise zu rechnen. ▶ Das öffentlich zugängliche Netz für Wasserstoff-Tankstellen ist noch vergleichsweise gering ausgebaut und bei der Anschaffungsplanung zu berücksichtigen (verglichen mit den Tankstellen-Netzen für Verbrenner und Ladesäulen-Netzen für Batterie-Fahrzeuge). Der derzeitige Wasserstoff-Preis beträgt 9,50 € / kg Wasserstoff. ▶ Eine aktuelle Übersicht zu in Betrieb, Aufbau oder Planung befindlichen Wasserstoff-Tankstellen in Deutschland und Europa ist unter https://h2.live/ abrufbar. ▶ Für den Fall, dass ein Elektrolyseur und/oder eine Wasserstoff-Tankstelle für einen bereits bestehenden Eigenverbrauch (bspw. Busse) installiert werden, können die PKW dort betankt werden. ▶ Laut Aussage der OEM liegt der Fokus der schnellen, breiten Marktverfügbarkeit zunächst bei LNF und SNF (Mitte der 2020er Jahre). FCEV werden erst gegen Ende der 2020er mit Nachdruck in den Markt gebracht und eine hohe Marktdurchdringung erfahren.		

Die Kraftstoffkosten verschiedener Antriebe liegen heute bereits nah beieinander.

5

Brennstoffzellen-PKW (VI/XII)

Wirtschaft-
liche Kenn-
zahlen:
Stand
heute

ICV* für Diesel der oberen Mittelklasse (BMW 320d Touring)



Verbrauch:	ca. 5,7 l / 100 km (Reichweite: > 800 km)
Kraftstoffpreis:	1,26 € / l (Durchschnitt des Jahres 2019)
Kraftstoffkosten:	ca. 7,18 € / 100km
Preis:	ca. 40.000 €

BEV** der oberen Mittelklasse (Tesla Model 3)



Verbrauch:	ca. 20 kWh / 100 km (Reichweite: ca. 400 km)
Strompreis:	ca. 0,3 € / kWh (Strompreis 2018)
Kraftstoffkosten:	6 € / 100 km
Preis:	ca. 65.000 €

FCEV der oberen Mittelklasse (Hyundai NEXO)



Verbrauch:	ca. 1 kg H ₂ / 100 km (Reichweite: 756 km)
Kraftstoffpreis:	9,5 € / kg H ₂ (Preis an der Wasserstofftankstelle)
Kraftstoffkosten:	ca. 9,5 € / 100 km
Preis:	ca. 69.000 €

*ICV = Internal combustion vehicle / PKW mit Verbrennungsmotor (Benzin/Diesel)

**BEV = Battery-electric vehicle / PKW mit batterie-betriebenen Elektromotor

58 Stand der Erarbeitung: Januar 2021

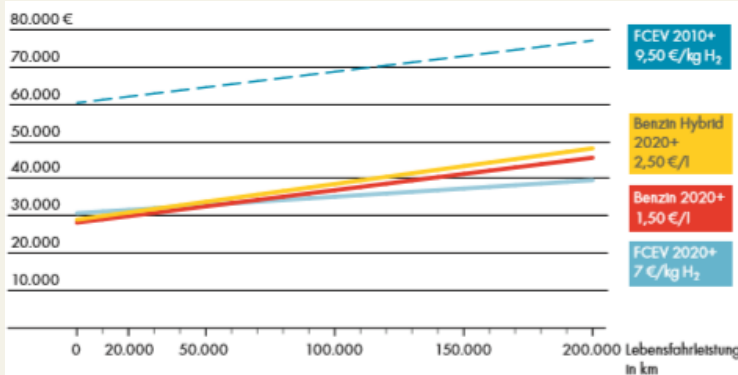
Sinken die Investitionskosten, wird das FCEV zukünftig wirtschaftlich konkurrenzfähig.

5

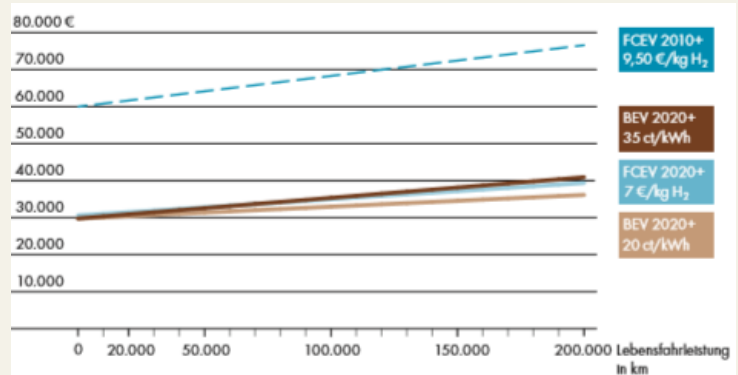
Brennstoffzellen-PKW (VII/XII)

Wirtschaft-
liche
Kenn-
zahlen
(Studie 1,
2017)

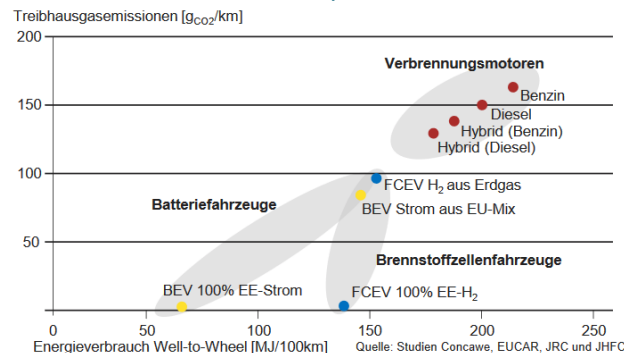
Autokostenvergleich FCEV und ICV/ICV-Hybride



Autokostenvergleich FCEV und BEV



EXKURS: THG-Emissionen und Well-to-Wheel-Emissionen verschiedener Antriebs- / Kraftstoff-Kombinationen

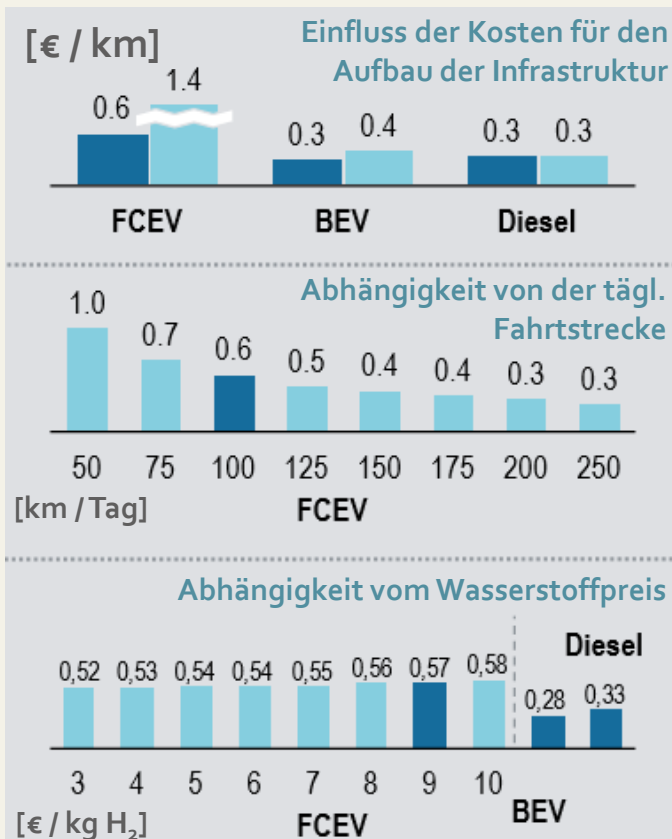
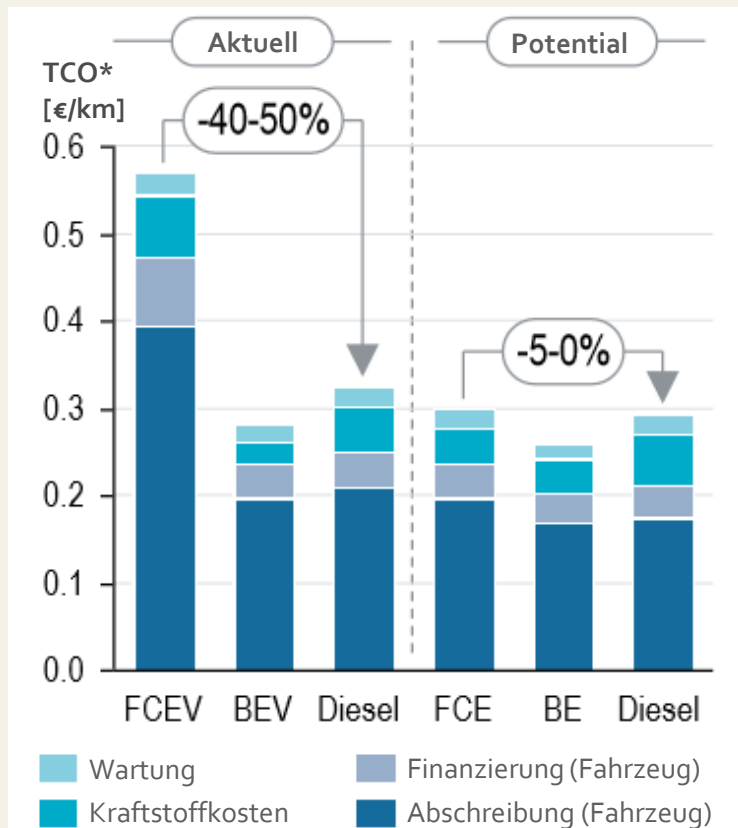


Eine TCO-Betrachtung bestätigt die konkurrenzfähige Wirtschaftlichkeit.

5

Brennstoffzellen-PKW (VIII/XII)

Wirtschaft-
liche Kenn-
zahlen
(Studie 2,
Herbst
2017)



* TCO: Total Cost of Ownership (Vollkostenbetrachtung)

Die Polizei in Berlin und Hamburg hat FCEV in ihren Fuhrpark aufgenommen.

5

Brennstoffzellen-PKW (IX/XII)

Umsetzungsbeispiel



POLIZEI
BERLIN



POLIZEI
Hamburg

- ▶ Die Berliner Polizei hat zwei Toyota Mirai in ihren Fuhrpark aufgenommen, die für Kontroll-, Transport- und Beförderungs-Fahrten eingesetzt werden sollen.
- ▶ Die Hamburger Polizei hat im Oktober 2019 einen Mercedes-Benz GLC F-Cell in ihren Fuhrpark aufgenommen.

Der Umweltbonus subventioniert FCEV mit bis zu 9.000 Euro.

5

Brennstoffzellen-PKW (X/XII)

Förderung (I/II)



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Umweltbonus des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie

Förderung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie

- ▶ Zeitraum: 19.02.2020 bis 31.12.2025
- ▶ Förderbudget: 2,09 Mrd. €
- ▶ Förderfähig sind reine Batterieelektrofahrzeuge, von außen aufladbare Hybridelektrofahrzeuge (Plug-In-Hybride) und Brennstoffzellenfahrzeuge sowie Fahrzeuge, die keine lokalen CO₂-Emissionen aufweisen und höchstens 50 g CO₂-Emissionen pro Kilometer verursachen.
- ▶ Das Fahrzeug muss sich auf der Liste der förderfähigen Elektrofahrzeuge des Bundesamtes für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA-Liste) befinden.
- ▶ Der Bonus gilt rückwirkend für alle Fahrzeuge, die ab dem 5.11.2019 zugelassen wurden. Das Fahrzeug darf nicht länger als 12 Monate zugelassen und maximal 15.000 km gefahren sein.

Fördersumme für Elektrofahrzeuge über einem Nettolistenpreis von 40.000 €

FCEV / BEV: 7.500 €

PHEV: 5.625 €

Fördersumme für Elektrofahrzeuge unter einem Nettolistenpreis von 40.000 €

FCEV / BEV: 9.000 €

PHEV: 6.750 €

- ▶ Antragsberechtigt sind Privatpersonen, Unternehmen, Unternehmen mit kommunaler Beteiligung, Stiftungen, Körperschaften und Vereine, auf die ein Neufahrzeug zugelassen wird und die sich verpflichten, das Fahrzeug sechs Monate zu halten. Zuwendungsempfänger ist der Antragsteller.

Das NIP II fördert die Anschaffung von FCEV-Flotten mit mindestens 3 Fahrzeugen.

5

Brennstoffzellen-PKW (XI/XII)

Förderung (II/II)



Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP II)

Bundes-Förderung: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur

- ▶ Zeitraum: 2016 bis 2026
- ▶ Förderbudget: 1,4 Mrd. € (für 10-Jahres-Zeitraum; ca. 60 % für die Marktaktivierung, 40 % für F&E für verschiedene Sektoren)
- ▶ Fördergegenstand:
 - „Investitionszuschüsse für: Fahrzeuge (Straße, Schiene und Wasser) und Flugzeuge, die mit einem Brennstoffzellenantrieb ausgestattet sind, und gegebenenfalls die für deren Betrieb notwendige Betankungs- und Wartungsinfrastruktur.. (...)“
 - Regierungsprogramm zur Fortsetzung des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie 2006 – 2016*
- ▶ Ablauf: Zur Antragseinreichung wird über einzelne befristete Calls aufgerufen, in denen die jeweiligen Förderschwerpunkte und die Rahmenbedingungen der Förderung präzisiert werden.
- ▶ Art der Zuwendung: nicht zurückzahlbarer Zuschuss; Kumulierungsverbot (für gleiche Kosten)
- ▶ Zuwendungshöhe: „Bemessungsgrundlage für Zuwendungen sind die zuwendungsfähigen projektbezogenen Ausgaben. Dies sind diejenigen Mehrausgaben, die durch den Einsatz der geförderten innovativen Technologie gegenüber dem Einsatz konventioneller Technologie bedingt sind. Gemäß Artikel 36 AGVO können die Investitionsmehrkosten mit bis zu 40 % bezuschusst werden. KMU können im Einzelfall höhere Beihilfeintensitäten gewährt werden. Bei PKW mit Brennstoffzellenantrieb (nach Nummer 2.1.1) erfolgt die Förderung ab einer näher im Aufruf zur Antragseinreichung festgelegten Mindeststückzahl.“

Die Vorteile des FCEV sind die lokale Emissionsfreiheit und kurze Betankungszeiten.



Zurück zum
Inhaltsverzeichnis

5

Brennstoffzellen-PKW (XII/XII)

Vergleich zu Alternativtechnologien

FCEV	BEV	ICV Benzin/Diesel
Vorteile - Keine lokalen Emissionen - Keine Well-to-Wheel-Emissionen, wenn der Wasserstoff aus CO₂-freien Quellen bezogen wird (bspw. durch Elektrolyse-Strom aus Erneuerbaren Energien; siehe Steckbrief 3) - Kurze Betankungszeit (~ 3 min) - Hohe Reichweiten (bis zu 700 km) Nachteile - Höhere Investitions- bzw. Anschaffungskosten (siehe Folien VI, VII und VIII) - Stand heute gering ausgebautes Tankstellen-Netz - Nur wenige Modelle bzw. verschiedene Fahrzeug-Klassen am Markt verfügbar	Vorteile - Keine lokalen Emissionen - Keine Well-to-Wheel-Emissionen, wenn der Strom aus CO₂-freien Quellen / Erneuerbaren Energien bezogen wird - Stark wachsende Ladesäulen-Infrastruktur - Ladesäulen sind flexibel aufstellbar (Zuhause / an der Arbeitsstelle) - Anzahl verfügbarer Modelle und Klassen höher als bei FCEV, aber noch geringer als bei ICV Nachteile - Geringere Reichweite: 150 - 470 km (Tesla auch über 600 km) - Vergleichsweise lange Ladezyklen (> 30 min, abgesehen von Tesla-Superchargern)	Vorteile - Flächendeckendes, ausgebautes Tankstellennetz - Flächendeckende Reparatur- und Wartungsexpertise - Hohe Reichweiten (bis zu 900 km) - Verfügbare Modelle in sämtlichen Modell- und Preisklassen Nachteile - Hohe lokale Emissionen - Höhere Geräuschbelastung - Sinkende gesellschaftliche und politische Akzeptanz - Keine mittelfristige Perspektive (s. Clean Vehicles Directive, Endlichkeit der Kraftstoffe) - Kraftstoffe Benzin und Diesel basieren heute zum Großteil (> 90 %) auf fossilen, endlichen Rohstoffen (Mineralöl)

6

Elektrolyseur

Ein Elektrolyseur erzeugt aus Strom Wasserstoff und Sauerstoff.

6

Elektrolyseur (I/XIII)

Mögliche Einsatzbereiche in der Emscher-Lippe Region

- ▶ In Industrieunternehmen
- ▶ An Erneuerbaren-Energien-Anlagen (Wind oder PV)

Kurzbeschreibung

- ▶ In einem Elektrolyseur wird elektrische Energie in chemische Energie umgewandelt. Mithilfe von Strom wird Wasser (H₂O) in Wasserstoff (H₂) und Sauerstoff (O₂) gespalten:



- ▶ Für die kommerzielle Herstellung von Wasserstoff kommen kurz- bis mittelfristig drei Elektrolyse-Technologien in Frage:
 - ▶ Alkalische Elektrolyse (AEC)*
 - ▶ Proton-Exchange-Membran-Elektrolyse (PEMEC)
 - ▶ Solid(Fest)-Oxid-Elektrolyse (SOEC)
- ▶ Die alkalische Elektrolyse wird seit gut 80 Jahren in der industriellen Prozesstechnik eingesetzt. Die PEM-Elektrolyse befindet sich in technisch ausgereiftem Zustand, eine Serienfertigung findet noch nicht statt. SO-Elektrolysen sind, abgesehen von Testanlagen, noch Gegenstand der Forschung.
- ▶ In Deutschland gibt es Elektrolyse-Kapazitäten mit einer Leistung von insgesamt 30 MW.

Wertschöpfungsstufe



Erzeugung



Verteilung & Speicherung



Nutzung

Muss-/Kann-Anwendung

2020	Muss	☐	
	Kann	☒	
2025	Muss	☐	RED II** NWS***
	Kann	☒	
2030	Muss	☐	RED II NWS
	Kann	☒	

*EC = Electrolysis Cell; **RED II: Erneuerbare-Energien-Richtlinie – Ziele: 14 % Beimischung erneuerbarer Energien im Kraftstoff und Anteil EE am Gesamtenergieverbrauch 32 % bis 2030

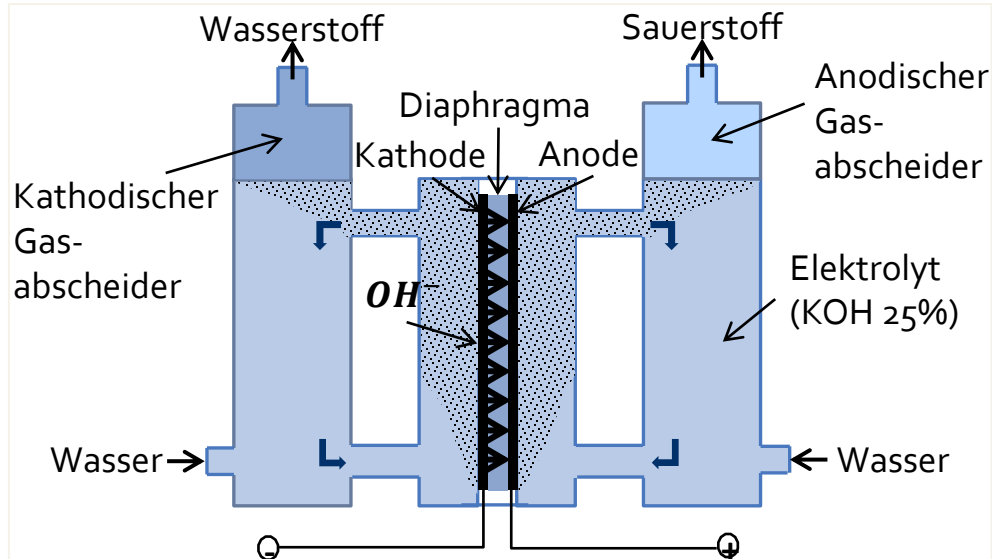
***NWS: Nationale Wasserstoffstrategie

Die alkalische Elektrolyse ist in der Praxis erprobt.

6

Elektrolyseur (II/XIII)

Schematische Darstellung AEC



- ▶ Bei der alkalischen Elektrolyse werden zwei Metallelektroden in eine alkalische, wässrige Lösung eingetaucht. Die Lösung wird durch eine permeable Membran getrennt.
- ▶ Bei Anlegung von elektrischer Spannung, entsteht an der Anode Sauerstoff und an der Kathode Wasserstoff.
- ▶ Die alkalische Elektrolyse ist, insbesondere in der Industrie, schon seit ungefähr 80 Jahren in Anwendung.

Technische Kennzahlen AEC

Betriebstemperatur:

40 – 90 °C

Wirkungsgrad:

2020: 65 – 67 %

2030: 68 – 71 %

2050: 69 – 80 %

Stromdichte:

0,2 – 0,6 A/cm²

Wasserverbrauch:

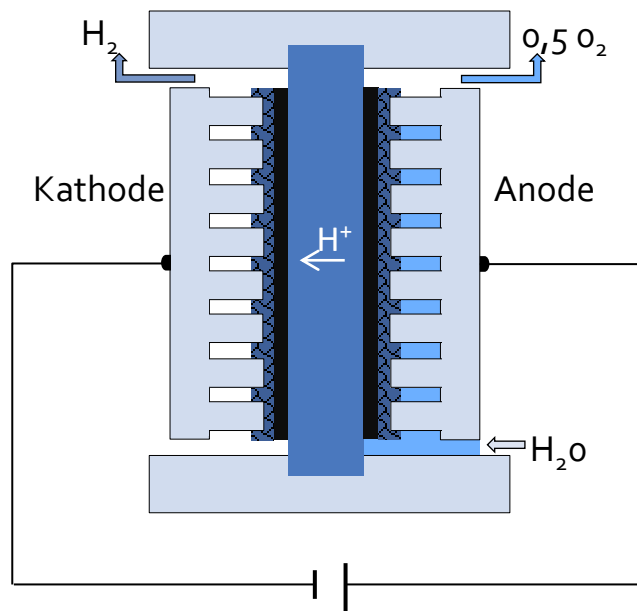
9 l / kg H₂

Mittelfristig ist die PEM-Elektrolyse die wirtschaftlichste Technologie.

6

Elektrolyseur (III/XIII)

Schematische Darstellung PEMEC



Technische Kennzahlen PEMEC

Betriebstemperatur:

40 – 100 °C

Wirkungsgrad:

2020: 63 – 67 %

2030: 63 – 71 %

2050: 68 – 80 %

Stromdichte:

1,0 – 2,5 A/cm²

Wasserverbrauch:

9 l / kg H₂

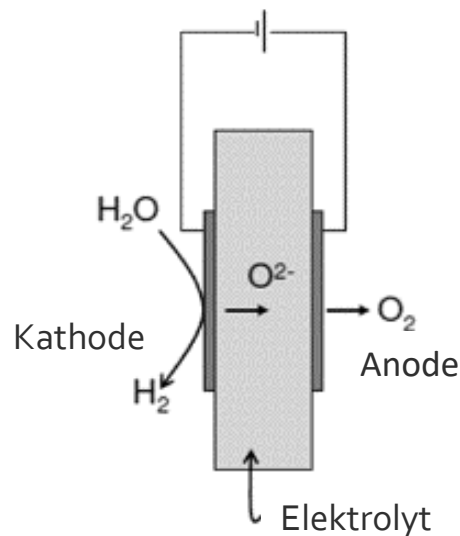
- ▶ Die PEMEC arbeitet in saurem Milieu, sodass Edelmetalle für die Elektroden eingesetzt werden, um Korrosion zu vermeiden.
- ▶ Die PEMEC verfügt über ein gutes Lastwechselverhalten, das schnell auf schwankende Strommengen reagieren kann.
- ▶ Die Technik ist vergleichsweise neu und noch nicht weit verbreitet.

Die Hochtemperatur-Elektrolyse ist noch eher Gegenstand der Forschung.

6

Elektrolyseur (IV/XIII)

Schematische Darstellung SOEC



Technische Kennzahlen SOEC

Betriebstemperatur:

700 – 1.000 °C

Wirkungsgrad:

2020: 81 %

2030: 83 %

2050: 83 – 90 %

Stromdichte:

~ 1,0 A/cm²

Wasserverbrauch:

9 l / kg H₂

- ▶ Die Solid-Oxid-Elektrolyse-Verfahren befinden sich momentan im Übergang zwischen Forschung und industrieller Anwendung.
- ▶ Die SOEC arbeiten bei sehr hohen Betriebstemperaturen, wodurch ein Teil der Energie, die zur Spaltung des Wassers aufgewendet werden muss, aus Wärme bereitgestellt werden kann. Dadurch sinkt der Strombedarf.

Langfristig werden sich PEM- und SO-Elektrolyse in PtX-Anlagen durchsetzen.

6

Elektrolyseur (V/XIII)

Vergleich der Elektrolyse-Technologien

AEC	PEMEC	SOEC
Vorteile ▶ Bereits seit Anfang des letzten Jahrhunderts in Anwendung in der Industrie und somit erprobte Technologie ▶ Hohe Langzeitstabilität ▶ Stand heute günstigste Elektrolyse-Technologie (siehe CAPEX/OPEX) Nachteile ▶ Träge Laständerung und relativ geringer Teillastbereich ▶ Im Vergleich zur PEM-Elektrolyse wartungsaufwendiger aufgrund komplexer Systemführung und eines flüssigen Elektrolyts	Vorteile ▶ Geringer Wartungs- und Instandhaltungs-Aufwand ▶ Keine Anwendung von gesundheitsgefährdenden Stoffen ▶ Ein Lastwechselverhalten, das schnell auf schwankende Strommengen reagieren kann ▶ Betrieb im Teillastbereich ist über die gesamte Bandbreite möglich Nachteile ▶ Einsatz von Edelmetallen als Elektroden zur Vermeidung von Korrosion ▶ Investitionskosten Stand heute höher als bei der AEC (siehe CAPEX/OPEX)	Vorteile ▶ Verringerter Strombedarf, da der Energiebedarf aus der eigenen Abwärme bereitgestellt werden kann ▶ Dadurch mit mehr als 80 % ein deutlich höherer Wirkungsgrad als AEC und PEMEC Nachteile ▶ Noch eher Gegenstand der Forschung und daher keine Komplettsysteme am Markt verfügbar ▶ Aufgrund der hohen Betriebstemperaturen längere Anfahrtszeiten

Die alkalische und PEM-Elektrolyse sind am Markt verfügbar.

6		Elektrolyseur (VI/XIII)			
Technology Readiness Level*		Anbieter (Auszug) (i/ii)			
2020	 F & E	☐			Allgemein: Die Elektrolyse-Technologie entwickelt sich stetig weiter und hängt von vielen Parametern ab, weshalb die angegebenen Werte nur die derzeitige Markt-Situation darstellen. Die Hersteller-Angaben zum Wirkungsgrad berücksichtigen nur den Elektrolyseur und betrachten nicht die ‚Balance of plant.‘
	 Kleinserie	☒			
	 Serienreife	☐			
2025	 F & E	☐			McPhy (AEC) Kleine Elektrolyseure für leichte Industrie (17 verschiedene Leistungsstufen): Max. H ₂ -Produktion: 0,4 - 12 Nm ³ /h; Elektrische Leistung: 3 – 63 kW Große Elektrolyseure für schwere Industrie und kontinuierlichen Betrieb (7 Leistungsstufen): Max. H ₂ -Produktion: 10 - 800 Nm ³ /h; Elektrische Leistung: 57 kW – 4 MW; Energiebedarf: 5,25 – 4,5 kWh/Nm ³ /h (Das 4 MW Modell kann modular auf bis zu 100 MW und 4.000 Nm ³ /h hochskaliert werden.)
	 Kleinserie	☐			
	 Serienreife	☒			
2030	 F & E	☐			NEL Hydrogen (Norwegen) (AEC)
	 Kleinserie	☐			
	 Serienreife	☒			
			H ₂ -Produktion [Nm ³ /h]	Energiebedarf [kWh/Nm ³]	H ₂ -Reinheit [%]
		A150	50 – 100	3,8 – 4,4	99,99 – 99,999
		A300	150 – 300	3,8 – 4,4	99,99 – 99,999
		A485	300 – 485	3,8 – 4,4	99,99 – 99,999
		A1000	600 – 970	3,8 – 4,4	99,99 – 99,999
		A3880	2.400 – 3.880	3,8 – 4,4	99,99 – 99,999

*Abschätzung für die 3 Elektrolyse-Technologien kombiniert

Sunfire forscht intensiv an der SO-Elektrolyse.

6

Elektrolyseur (VII/XIII)

Anbieter (Auszug) (ii/ii)

NEL Hydrogen (Norwegen) (PEMEC)

	H ₂ -Produktion [Nm ³ /h]	Energiebedarf [kWh/Nm ³]	H ₂ -Reinheit [%]
M100, M200, M400, M4000	103; 207; 413; 4.000	4,53	99,9998
Die M-Series eignet sich insbesondere für die Herstellung von H ₂ aus EE, da die Anfahrtszeiten schnell und flexibel sind			
C10, C20, C30	10; 20; 30	6,2	99,9998
H2, H4, H6	2; 4; 6	7,3; 7; 6,8	99,9995

iGas energy (PEMEC)

Lebensdauer: 20 a / 80.000 h	H ₂ -Produktion [Nm ³ /h]	Energiebedarf [kWh/Nm ³]	Anschlussleistung [kW]
gEl 10/30/60-300 PEM MD	10; 30; 60	5,4; 5,2; 5,2	75; 205; 400
gEl 100/160/320-1250 PEM MD	100; 160; 320	5,4; 5,4; 5,3	660; 1.050; 2.070

Sunfire GmbH (SOEC, Testanlage)

	H ₂ -Produktion [Nm ³ /h]	Energiebedarf [kWh/Nm ³]	Anschlussleistung [kW]
HYLINK	40	3,7	150 (modular, bis in den Megawatt-Bereich ausbaubar)

Weitere Hersteller: Siemens, Areva H2Gen, H-Tec Systems, Inabata Europe, ITM Power, Proton OnSite, Hydrogenics

Bis 2030 werden die Kosten der PEM- und SO-Elektrolyse konkurrenzfähig ggü. AEC.

6

Elektrolyseur (VIII/XIII)

		2020		2030		2050	
		CAPEX	OPEX**	CAPEX	OPEX	CAPEX	OPEX
Investition und Betrieb*	AEC	4.000 €/(Nm ³ /h) = 900 €/kW	~ 18 €/kW	3.000 €/(Nm ³ /h) = 700 €/kW	~ 24 €/kW	2.100 €/(Nm ³ /h) = 500 €/kW	~ 27 €/kW
	PEMEC	7.000 €/(Nm ³ /h) = 1.500 €/kW	~ 13 €/kW	4.000 €/(Nm ³ /h) = 800 €/kW	~ 8 €/kW	2.200 €/(Nm ³ /h) = 550 €/kW	~ 7 €/kW
	SOEC	9.000 €/(Nm ³ /h) = 2.300 €/kW	~ 32 €/kW	1.800 €/(Nm ³ /h) = 400 €/kW	~ 12 €/kW	1.000 €/(Nm ³ /h) = 250 €/kW	~ 8 €/kW

Wirtschaft- licher Rahmen

- Die Forschung beschäftigt sich intensiv mit der Weiterentwicklung der PEM- und SO-Elektrolysen, sodass in den kommenden Jahren und Jahrzehnten mit einem deutlichen Rückgang der Investitions- und Wartungs-Kosten zu rechnen ist.
- Für die Werte der SOEC ist anzumerken, dass die Technologie noch in einem sehr frühen Entwicklungsstadium ist und die Werte somit noch mit Unschärfen behaftet sind.
- Die hohen Instandhaltungs-Kosten der AEC-Elektrolyse resultieren aus einer komplexeren Systemführung und dem Einsatz eines flüssigen Elektrolyten.
- Die notwendigen Stack-Erneuerungen sind in den oben angegebenen Werten nicht miteinbezogen, da die Austauschintervalle von den Betriebsstunden bzw. der Erreichung der Stack-Lebensdauer abhängen.

* Hier liegt eine Studie der NOW zugrunde, bei der die Mittelwerte der Systemgrößen 1 MW, 10 MW, 100 MW genommen wurden

73 Stand der Erarbeitung: Januar 2021

** jährliche Wartungs- und Instandhaltungskosten

Die Gestehungskosten für Wasserstoff hängen stark vom Strompreis ab.

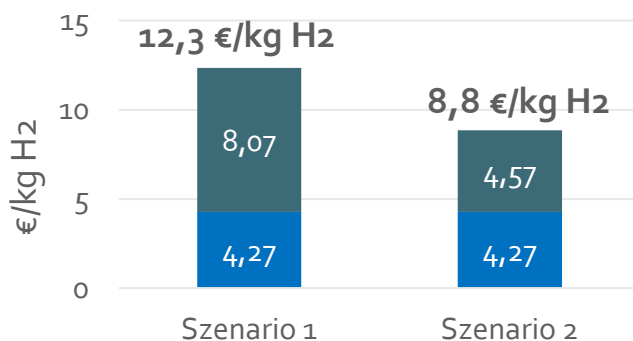
6

Elektrolyseur (IX/XIII)

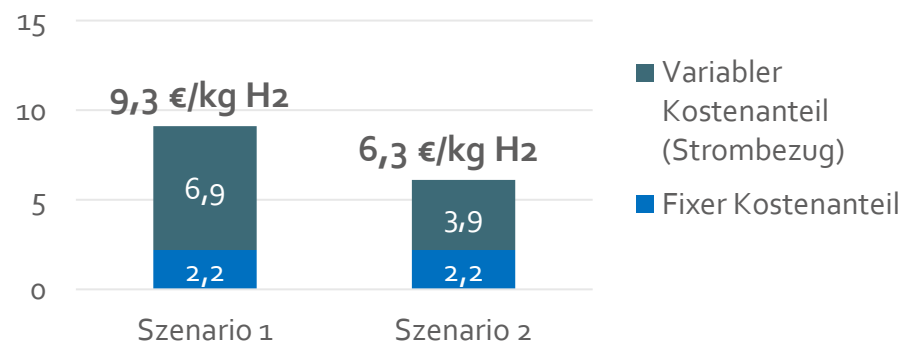
Wirtschaftliche Kennzahlen

- ▶ **Elektrolyseur-Konfiguration „Heute“:** CAPEX: 1.000 €/kW; Wirkungsgrad: 60 %; Nutzungsdauer der Anlage: 20 Jahre; Kapitalzins: 7 %; Volllaststunden: 1.750 h
 - ▶ Daraus ergeben sich fixe Kosten von: **12,8 ct/kWh**
- ▶ **Elektrolyseur-Konfiguration „2030“:** CAPEX: 600 €/kW; Wirkungsgrad: 70 %; Nutzungsdauer der Anlage: 20 Jahre; Kapitalzins: 7 %; Volllaststunden: 1.750 h; EEG-Umlage: konstant
 - ▶ Daraus ergeben sich fixe Kosten von: **6,6 ct/kWh**
- ▶ Für den Strombezug werden 2 Szenarien für den Bezug aus EE angenommen (Strompreis für mittelständische Industrie mit 160.000 bis 20 Mio. kWh/a):
 - ▶ **Szenario 1:** Netzstrom mit Herkunftsnachweisen: **14,5 ct/kWh**
 - ▶ **Szenario 2:** Eigenversorgung mit teilweise Befreiung von der EEG-Umlage (-60%): **8,2 ct/kWh**

Elektrolyseur-Konfiguration „Heute“:



Elektrolyseur-Konfiguration „2030“:



Vergleichbare Marktkosten von Wasserstoff sind wenig aussagekräftig.

6

Elektrolyseur (X/XIII)

Wirtschaft- liche Kenn- zahlen

Vergleichskosten für Wasserstoff:

Wasserstoffkosten [€/kg H₂]

Eigene Berechnung (Elektrolyseur-Konfiguration 1)

8,8 – 12,3

Tankstellenpreis für Fahrzeuge

9,5

Leichte Industrie *

Fett- und Öl-Industrie

3,2 – 4,1

Glas-Industrie

3,0 – 3,8

Elektronik-Industrie

3,0 – 3,9

Metallurgische Industrie

3,8 – 4,9

- ▶ **Wichtig:** Die Herkunft des Wasserstoffs ist nicht eindeutig gekennzeichnet und ist, im Gegensatz zu unseren Berechnungsannahmen, kein reiner „grüner“ Wasserstoff. Dadurch ist eine direkte Vergleichbarkeit der Preise mit Vorsicht zu betrachten.
- ▶ Neben dem Produkt Wasserstoff fallen in einem Elektrolyseur zusätzlich Sauerstoff und Abwärme in nicht unerheblichen Mengen an. Diese können genutzt oder vermarktet werden.
 - ▶ Die Abwärme kann in eigene Prozesse oder ein Wärmenetz eingespeist werden.
 - ▶ Der Sauerstoff kann bspw. an Klärwerke weiterverkauft werden, dort kann zukünftig Ozon (O₃) für die Abwasserbehandlung benötigt werden.

* Anlieferung per Trailer, Kosten bis 2025

Über das NIP II werden in Gesamtsysteme eingebundene Elektrolyseure gefördert.

6

Elektrolyseur (XI/XIII)

Förderung (I/II)



Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP II)

Bundes-Förderung: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur

- ▶ Zeitraum: 2016 bis 2026
- ▶ Förderbudget: 1,4 Mrd. € (für 10-Jahres-Zeitraum; ca. 60 % für die Marktaktivierung, 40 % für F&E für verschiedene Sektoren)
- ▶ Fördergegenstand:
 - „Technologisch stellt daher im NIP die Entwicklung kostengünstiger und marktfähiger Elektrolyseure einen Schwerpunkt sowohl in der Forschung und Entwicklung als auch in der Auswertung der Ergebnisse vorhandener Demonstrationsanlagen dar. (...)“
 - Regierungsprogramm zur Fortsetzung des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie 2006 – 2016*
- ▶ Ablauf: Zur Antragseinreichung wird über einzelne befristete Calls aufgerufen, in denen die jeweiligen Förderschwerpunkte und die Rahmenbedingungen der Förderung präzisiert werden.
- ▶ Art der Zuwendung: nicht zurückzahlbarer Zuschuss; Kumulierungsverbot (für gleiche Kosten)
- ▶ Zuwendungshöhe: 40 % der Investitionsmehrkosten gegenüber konventioneller Technologie
- ▶ Abwicklung der Aufrufe: Projektträger Jülich (PtJ)
- ▶ Laut Regierungsprogramm steht „insbesondere auch die Erprobung innovativer Gesamtsysteme im Alltag“ im Fokus. Daher ist es förderlich, für den Zuspruch von Fördergeldern eine Anwendung für den hergestellten Wasserstoff zu haben, beispielsweise als Kraftstoff für Busse oder Abfallsammler (siehe auch Steckbrief 8).

Das FCH Joint Undertaking koordiniert und fördert europaweite H2-Projekte.



6

Elektrolyseur (XII/XIII)

Förderung (II/II)



Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU)

Privat-öffentliche Vereinigung aus Europäischer Kommission, Hydrogen Europe und Hydrogen Europe Research

- ▶ Mithilfe der Fördergelder aus den Programmen FP7 (Framework Programme for Research) und Horizon 2020 der Europäischen Kommission (als FCH 2 JU) werden Forschung, Demonstrations-Projekte und technologische Entwicklung mit Bezug zur Wasserstoff-Technologie gefördert.
- ▶ Für ausgeschriebene Projekte sind innerhalb von befristeten Calls die Anträge einzureichen. Die Projekt-Aufrufe müssen daher laufend sondiert werden hinsichtlich der Förderschwerpunkte und -summen (siehe auch <https://www.fch.europa.eu/page/call-2020>).

Die weltweit größte Elektrolyse hat die Wasserstoff-Produktion in 2019 aufgenommen.



Zurück zum
Inhaltsverzeichnis

6

Elektrolyseur (XIII/XIII)

Umsetzungsbeispiel



Verbund

SIEMENS

voestalpine
ONE STEP AHEAD.



H2FUTURE – Green Hydrogen

- ▶ Projektlaufzeit: 2017 – 2021
Projektbudget: 18 Mio. € (12 Mio. € werden durch FCH JU gefördert)
- ▶ Forschungsschwerpunkte:
 - ▶ Industrielle Produktion von „grünem“ Wasserstoff für die Stahlindustrie.
 - ▶ Erforschung des Potentials zur Bereitstellung von Netzdienstleistungen und dem möglichen Ausgleich von Schwankungen im Stromnetz.
- ▶ Der PEM-Elektrolyseur von Siemens (SILYZER) hat eine Anschlussleistung von 6 MW, erzeugt 1.200 m³ Wasserstoff pro Stunde und ist damit die weltweit größte Pilotanlage zur CO₂-freien Herstellung von „grünem“ Wasserstoff.
- ▶ Am Standort der voestalpine-Fabrik in Linz (Österreich) hat am 11.11.2019 die Produktion von grünem Wasserstoff begonnen.

Brennstoffzellen-Gabelstapler

Im Material Handling ist die Brennstoffzelle bereits marktreif.



Zurück zum
Inhaltsverzeichnis

7

BZ-Gabelstapler (I/XI)

Mögliche Einsatzbereiche in der Emscher-Lippe Region

- ▶ In der Industrie (z. B. Chempark Marl)
- ▶ In der Hafenlogistik (z. B. Industriehafen Gelsenkirchen)

Kurzbeschreibung

- ▶ Brennstoffzellen-Gabelstapler wandeln an Bord Wasserstoff in Strom um, der einen Elektromotor antreibt.
- ▶ Brennstoffzellen-Gabelstapler sind lokal CO₂-frei und setzen keine Stickoxid- oder Partikelemissionen frei. Ihre einzige „Emission“ ist reines Wasser bzw. Wasserdampf.
- ▶ Der Einsatz der Brennstoffzelle in Gabelstaplern bzw. dem Material Handling ist eine der am weitesten ausgereiften und entwickelten Anwendungsgebiete der Brennstoffzelle. Die Funktionalität wurde in mehreren Langzeit-Anwendungsprojekten unter Beweis gestellt.
- ▶ Die Anwendung ist wirtschaftlich und in großer Stückzahl (> 25.000) weltweit im Einsatz. Zahlreiche große Unternehmen wie BMW, Daimler, Walmart oder Carrefour nutzen in ihren Lagern bereits Brennstoffzellen-Gabelstapler und andere Förder-Fahrzeuge mit Brennstoffzelle.

Wertschöpfungsstufe



Erzeugung



Verteilung &
Speicherung



Nutzung

Muss-/Kann-Anwendung

2020 **Muss** ☐ Clean Vehicles Directive
Kann ☒

2025 **Muss** ☒ Clean Vehicles Directive
Kann ☐

2030 **Muss** ☒ Clean Vehicles Directive
Kann ☐

Die Brennstoffzelle erzeugt Strom, der über einen Elektromotor Vortrieb generiert.

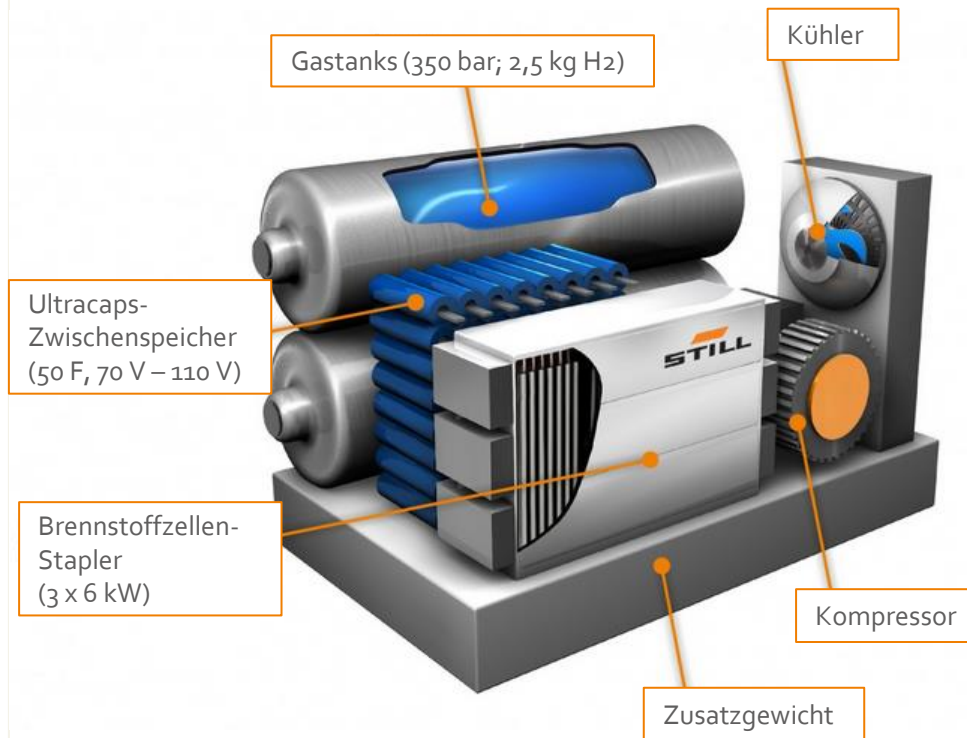
7

BZ-Gabelstapler (II/XI)

Schematische Darstellung

Technische Kennzahlen BZ-Gabelstapler

Aufbau eines Brennstoffzellen-Powerpack von Still



Komponenten:

Brennstoffzelle, H₂-Tank, Batterie, Luftverdichter, Elektromotor, Kühler,

Betriebsdauer:

ca. 6 – 8 h

Verbrauch:

Ca. 0,15 kg H₂/h

Betankungszeit:

2 – 3 min.

Lebensdauer der Brennstoffzelle:

ca. 10.000 Betriebsstunden

Maße der Wasserstoffzapfstelle:

2 – 3 m²

<https://www.still.de/en-DE/solution-competence/innovations-made-by-still/fuel-cell-technology.html>

Linde MH und STILL sind die beiden dominierenden Hersteller.

7		BZ-Gabelstapler (III/XI)		
Technology Readiness Level		Anbieter (Auszug) (i/ii)		
2020	 F & E	☐		
	 Kleinserie	☐		
	 Serienreife	☒		
2025	 F & E	☐		
	 Kleinserie	☐		
	 Serienreife	☒		
2030	 F & E	☐		
	 Kleinserie	☐		
	 Serienreife	☒		
		Linde Material Handling Der Hersteller entwickelt bereits seit 2000 Material Handling-Produkte mit Brennstoffzelle. Neben Gabelstaplern fallen darunter Nieder- und Hochhubwagen, Schubmaststapler und Schlepper.		
			Tragkraft	Hubhöhe
		E12 – E20 EVO	0 – 2.000 kg	0 – 6.475 mm
		E16 – E20 EVO	0 – 2.000 kg	0 – 6.475 mm
		E20 – E35	0 – 3.500 kg	0 – 7.780 mm
		E20 – E35 R	0 – 3.500 kg	0 – 7.780 mm
		E35 – E50 EVO	0 – 5.000 kg	0 – 6.315 mm
		STILL GmbH		
			Tragkraft	Hubhöhe
		RX 60 2,5 – 3,5 t	Bis zu 3.500 kg	0 – 6.475 mm
		FM-X	Bis zu 2.500 kg	Bis zu 13.000 mm
		Weitere Hersteller: Toyota Material Handling, Plug Power, Jungheinrich, CAT, Hyster-Yale, Fronius		

Die Wahl der Antriebstechnologie hängt von den Einsatzbedingungen ab.

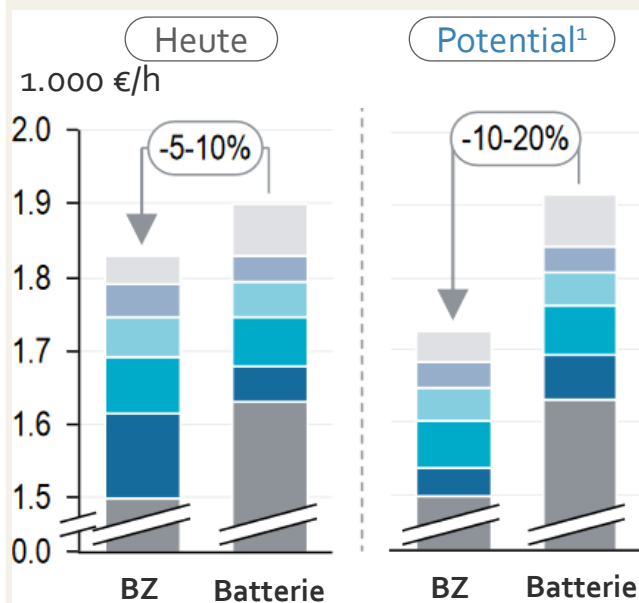
7	BZ-Gabelstapler (IV/XI)		
Investition und Betrieb	2020 CAPEX -	2025 CAPEX -	2030 CAPEX -
Wirtschaft- licher Rahmen	- Der Einsatz der Brennstoffzelle ist insbesondere für Betriebe mit energieintensiven Einsatzprofilen und Dreischichtbetrieb (Verteilzentren, Lager im Großhandel) geeignet. - Die Kosten einer Brennstoffzelle für die Gabelstapler sind auf dem Niveau von Lithium-Ionen-Batterien (vgl. Folie VI). Weitere Vorteile der Brennstoffzelle ggü. dem Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien sind: - Wegfall des Batteriewechsels und der notwendigen Infrastruktur, dadurch: Zeitersparnis, kontinuierlicher Weiterbetrieb, besseres und einfacheres Handling für Mitarbeiter - Deutlich geringere „Betankungs“-Zeiten - Lange Lebensdauer der Brennstoffzelle von mindestens 10.000 Betriebsstunden - Die Technologie funktioniert auch bei extremen Temperaturen, bspw. bei minus 30 Grad in Tiefkühl-Lagern. - Berücksichtigt werden muss die Bereitstellung des Wasserstoffs und die entsprechende Infrastruktur im Einsatzareal. Der Aufbau einer Infrastruktur ist bei batterieangetriebenen Fahrzeugen ebenso einzuplanen. - Die Wahl der Antriebstechnologie ist jedoch im Einzelfall zu bewerten und stark von den Einsatzbedingungen abhängig (Auslastung, Temperaturen, Raumverfügbarkeit, Warenumsatz).		

Bereits heute ist das Brennstoffzellen-System wirtschaftlich.

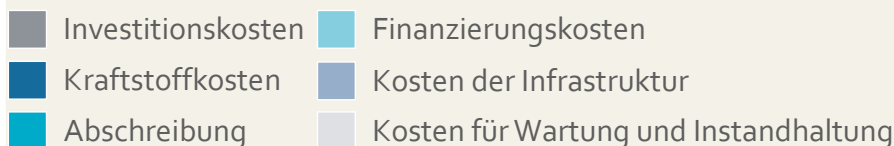
7

BZ-Gabelstapler (V/XI)

TCO¹-Betrachtung



¹ Annahmen für ein zukünftiges Szenario (siehe Tabelle links)



	BZ-Gabelstapler	Gabelstapler mit Batterie
Flottengröße:	100	106
CAPEX		
Fahrzeug [€]:	~ 35.000 / ~ 30.000 ¹	~ 20.000
Austausch [€]:	-	~ 10.000
Refuelling-Station [€]:	~ 1,5 Mio. / ~ 1,2 Mio. ¹	~ 950.000
Kraftstoff		
Verbrauch (pro h):	Wasserstoff ~ 0,15 kg / ~ 0,1 kg ¹	Elektrizität ~ 3 – 4 kW
Kosten [€/kH ₂]; [€/kW]:	8 / 4 ¹	0,14 / 0,18 ¹
Wartung		
Gabelstapler pro h:	~ 0,3	~ 0,67
Refuelling-Station [€]:	~ 65.000 / ~ 45.000 ¹	~ 35.000
Arbeitskosten		
Tankpersonal [€]:	-	~ 205.000

Wirtschaftliche Kennzahlen (Studie 1, 2017)

¹ TCO: Total Cost of Ownership (Vollkostenbetrachtung)

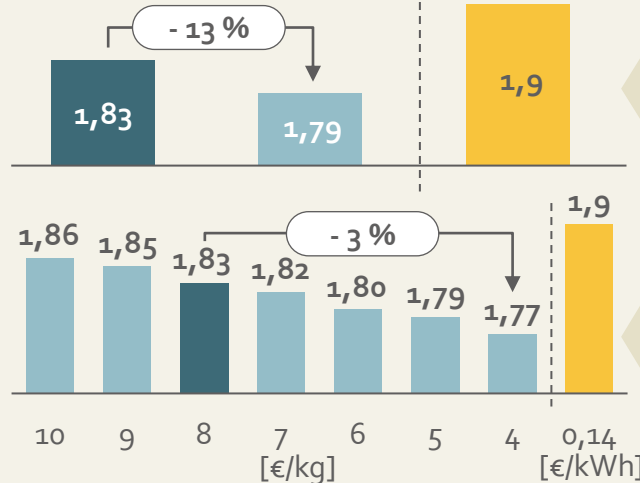
Sinkende H2-Kosten haben einen relativ geringen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit.

7

BZ-Gabelstapler (VI/XI)

Wirtschaft-
liche
Kenn-
zahlen
(Studie 1,
2017)

Auswirkungen auf die TCO [tausend €/ Betriebssunde]



Verringerung des Wasserstoff-Verbrauchs um 0,1 kgH₂/h.

Verringerung der Wasserstoffkosten von acht auf vier Euro pro Kilogramm.

Erhöhung des Gabelstapler-Betriebs auf einen 3-Schicht-Betrieb.

TCO BZ-Gabelstapler
Base Case

TCO BZ-Gabelstapler
angepasste Variablen

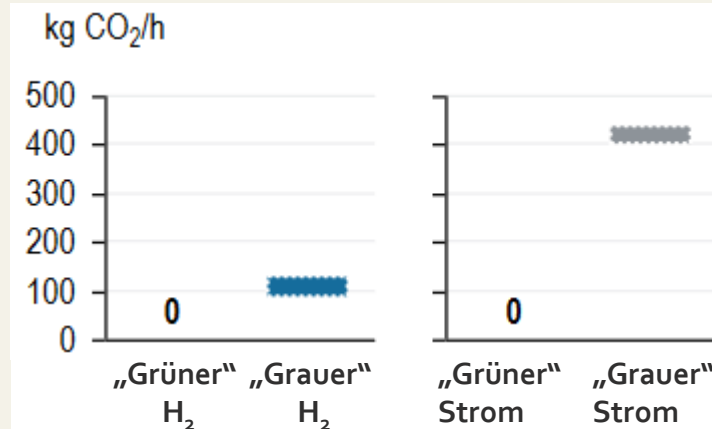
TCO batterieelektrischer Gabelstapler
Base Case

Die Well-to-Wheel-Emissionen hängen stark von den Kraftstoffquellen ab.

7

BZ-Gabelstapler (VII/XI)

Ökologische Kenn-
zahlen
(Studie 1,
Herbst
2017)



- ▶ Die Well-to-Wheel-Emissionen hängen stark von der Quelle des Stromes und des Wasserstoffs ab.
- ▶ Beim Einsatz von Wasserstoff, der über Dampfreformierung aus Erdgas gewonnen wird („Grauer“ H₂), entstehen, pro Stunde Einsatz, ca. 100 kgCO₂.
- ▶ Die Emissionen von „grauem“ Strom sind stark von den betrachteten Stromquellen abhängig.

Die kurze Betankungszeit ist der größte Vorteil der Brennstoffzelle.

7

BZ-Gabelstapler (VIII/XI)

Vergleich zu Alternativtechnologien

Gabelstapler mit Brennstoffzelle

Vorteile

- ▶ Keine lokalen Emissionen
- ▶ Keine Well-to-Wheel-Emissionen, wenn der Wasserstoff aus CO₂-freien Quellen bezogen wird (bspw. durch Elektrolyse-Strom aus Erneuerbaren Energien; siehe Steckbrief 3)
- ▶ Kurze Betankungszeit (~ 3 min.)
- ▶ Saubere Alternative zu Blausäure-Batterien (Eignung für hygienekritische Branchen)
- ▶ Platzsparend ggü. Batteriestationen (2 – 3 qm)

Nachteile

- ▶ Weniger geeignet für Betrieb mit kurzer Spitzenlast und längeren Leerlaufzeiten
- ▶ Platzbedarf für notwendige Wasserstoff-Infrastruktur

Gabelstapler mit Batterie

Vorteile

- ▶ Keine lokalen Emissionen
- ▶ Keine Well-to-Wheel-Emissionen, wenn der Strom aus CO₂-freien Quellen / Erneuerbaren Energien bezogen wird
- ▶ Geeignet für Betrieb mit kurzer Spitzenlast und längeren Leerlaufzeiten

Nachteile

- ▶ Weniger geeignet für langen (zeitlich, Strecke), kontinuierlichen Betrieb
- ▶ Vergleichsweise lange Ladezyklen bzw. zeitaufwendiger Batteriewechsel
- ▶ Platzbedarf für Laderäume
- ▶ Anfälliger für extreme Temperaturen

Gabelstapler mit Diesel-Antrieb

Vorteile

- ▶ Bewährte, ausgereifte Technologie
- ▶ Bestehende (Betankungs-) Infrastruktur in den Unternehmen

Nachteile

- ▶ Hohe lokale Emissionen
- ▶ Höhere Geräuschbelastung
- ▶ Sinkende gesellschaftliche und politische Akzeptanz
- ▶ Keine mittelfristige Perspektive (Endlichkeit der Kraftstoffe)
- ▶ Kraftstoffe Benzin und Diesel basieren heute zum Großteil (> 90 %) auf fossilen, endlichen Rohstoffen (Mineralöl)
- ▶ Steigende Investitionskosten

In Europa haben zahlreiche Demo-Projekte zu positiven Ergebnissen geführt.

7

BZ-Gabelstapler (IX/XI)

Umsetzungsbeispiel

**BMW
GROUP**



- ▶ BMW setzt in ihrem Leipziger Werk seit Ende 2018 mehr als 80 Gabelstapler und Routenzüge mit Brennstoffzellenantrieb ein. Ein Konsortium aus Linde Material Handling, Günsel und der TU München betreut das Projekt.
- ▶ Das Projekt wird vom Bundesverkehrsministerium aus dem Nationalen Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie gefördert.

STILL



- ▶ In der Logistikbasis von Carrefour Supply Chain in Nordfrankreich sind auf einer Fläche 58.000 m² 137 Lagerlogistik-Fahrzeuge von STILL für den Brennstoffzellen-Einsatz umgerüstet worden. Die erste Fahrzeug-Auslieferung war im September 2017.
- ▶ Das Projekt wird durch die EU finanziert und vom FCH JU und der Ludwig-Bölkow-Systemtechnik koordiniert.

Über das NIP II werden BZ-Fahrzeuge mit bis zu 40 % der Investitionskosten gefördert.

7

BZ-Gabelstapler (X/XI)

Förderung (I/II)



Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP II)

Bundes-Förderung: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur

- ▶ Zeitraum: 2016 bis 2026
- ▶ Förderbudget: 1,4 Mrd. € (für 10-Jahres-Zeitraum; ca. 60 % für die Marktaktivierung, 40 % für F&E für verschiedene Sektoren)
- ▶ Fördergegenstand:
 - „Investitionszuschüsse für: Fahrzeuge (Straße, Schiene und Wasser) und Flugzeuge, die mit einem Brennstoffzellenantrieb ausgestattet sind, und gegebenenfalls die für deren Betrieb notwendige Betankungs- und Wartungsinfrastruktur.. (...)“
 - Regierungsprogramm zur Fortsetzung des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie 2006/2016*
- ▶ Ablauf: Zur Antragseinreichung wird über einzelne befristete Calls aufgerufen, in denen die jeweiligen Förderschwerpunkte und die Rahmenbedingungen der Förderung präzisiert werden.
- ▶ Art der Zuwendung: nicht zurückzahlbarer Zuschuss; Kumulierungsverbot (für gleiche Kosten)
- ▶ Zuwendungshöhe:

„Bemessungsgrundlage für Zuwendungen sind die zuwendungsfähigen projektbezogenen Ausgaben. Dies sind diejenigen Mehrausgaben, die durch den Einsatz der geförderten innovativen Technologie gegenüber dem Einsatz konventioneller Technologie bedingt sind. Gemäß Artikel 36 AGVO können die Investitionsmehrkosten mit bis zu 40 % bezuschusst werden. KMU können im Einzelfall höhere Beihilfeintensitäten gewährt werden. (...)“

Das FCH Joint Undertaking koordiniert und fördert europaweite H2-Projekte.

7

BZ-Gabelstapler (XI/XI)

Förderung (II/II)



Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU)

Privat-öffentliche Vereinigung aus Europäischer Kommission, Hydrogen Europe und Hydrogen Europe Research

- ▶ Mithilfe der Fördergelder aus den Programmen FP7 (Framework Programme for Research) und Horizon 2020 der Europäischen Kommission (als FCH 2 JU) werden Forschung, Demonstrations-Projekte und technologische Entwicklung mit Bezug zur Wasserstoff-Technologie gefördert.
- ▶ Für ausgeschriebene Projekte sind innerhalb von befristeten Calls die Anträge einzureichen. Die Projekt-Aufrufe müssen daher laufend hinsichtlich der Förderschwerpunkte und -summen sondiert werden (siehe auch <https://www.fch.europa.eu/page/call-2020>).

Brennstoffzellen-Rangierlok

Die Brennstoffzelle hat sich im Schienenverkehr in ersten Pilot-Projekten bewährt.



Zurück zum
Inhaltsverzeichnis

8

Brennstoffzellen-Rangierlok (I/XI)

Mögliche Einsatzbereiche in der Emscher-Lippe Region

- Logistik / Güterverkehr
- Hafenlogistik

Kurzbeschreibung

- Brennstoffzellen-Rangierloks nutzen gasförmigen Wasserstoff als Energieträger. Eine Brennstoffzelle wandelt an Bord unter Hinzugabe von Sauerstoff die chemische Energie des Wasserstoffs in elektrische Energie um. Diese wiederum wird in einem Elektromotor zum Antrieb genutzt.
- BZ-Rangierloks sind lokal CO₂-frei und setzen keine Stickoxid- oder Partikelemissionen frei. Ihre einzige „Emission“ ist reines Wasser bzw. Wasserdampf.
- Der Energieträger Wasserstoff gewinnt im Bereich Schiene zunehmend an Relevanz. Insbesondere im Bereich des Passagier-Verkehrs werden in Pilot-Projekten zunehmend Brennstoffzellen getestet und eingesetzt.
 - Das französische Unternehmen Alstom hat bspw. in mehreren Pilot-Projekten den Einsatz von Brennstoffzellen-Zügen ausführlich getestet und für den regulären Einsatz ab 2021 alleine nach Niedersachsen bereits 14 Triebwagen verkauft.
- Im Bereich der Rangierloks ist die Entwicklung hingegen noch nicht so weit fortgeschritten und es sind nur wenige Prototypen-Projekte bekannt.
- Die Brennstoffzelle steht im Einsatz in Rangierloks in Konkurrenz zum Batterie-Betrieb.

Wertschöpfungsstufe



Erzeugung



Verteilung &
Speicherung



Nutzung

Muss-/Kann-Anwendung

2020 Muss ☐ Kann ☒

2025 Muss ☐ Kann ☒

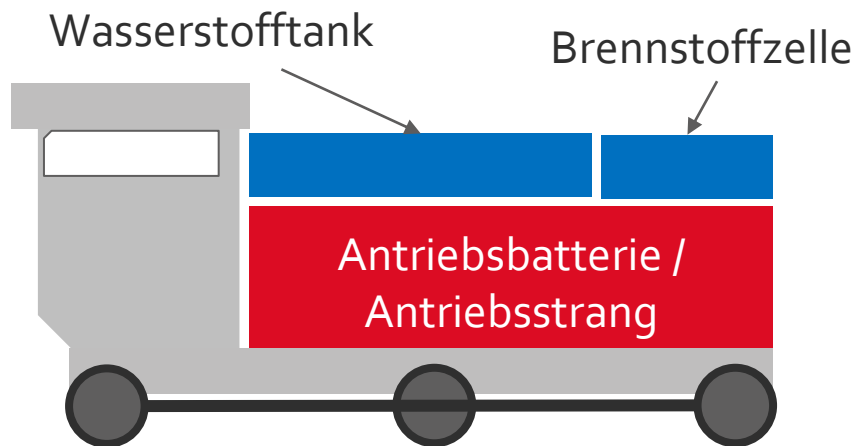
2030 Muss ☐ Kann ☒

Die Brennstoffzelle erzeugt Strom, der über einen Elektromotor Vortrieb generiert.

8

Brennstoffzellen-Rangierlok (II/XI)

Schematische Darstellung



Technische Kennzahlen FCEV

Komponenten:

Brennstoffzelle, H₂-Tank, Batterie, Luftverdichter, Elektromotor

Verbrauch:

~0,39 – 0,72 kg H₂/ km

Auf Basis von: <http://www.railway-research.org/IMG/pdf/r.2.2.3.3.pdf>

Zurzeit gibt es nur Rangierlok-Prototypen,
die auf Brennstoffzellen umgerüstet wurden.

8 Brennstoffzellen-Rangierlok (III/XI)		
Technology Readiness Level	Anbieter (Auszug) (i/ii)	
2020	Allgemein: Stand heute gibt es keine Hersteller, die Rangierloks vertreiben, die mit Brennstoffzellen angetrieben werden oder entsprechende Umrüstungen für Bestands-Loks anbieten. Zurzeit existieren maximal Prototypen, bei denen Bestands-Loks umgerüstet wurden. Dieses sind unter der Kategorie „Umsetzungsbeispiele“ zu finden.	
		 F & E 
		 Kleinserie ☐
 Serienreife ☐		
2025		
		 F & E ☐
		 Kleinserie 
 Serienreife ☐		
2030		
	 F & E ☐	
	 Kleinserie ☐	
 Serienreife 		

Die Wahl des Antriebs ist an die fall-spezifischen Einsatzbedingungen geknüpft.

8

Brennstoffzellen-Rangierlok (IV/XI)

Investition und Betrieb	2020 CAPEX -	2025 CAPEX ca. 2 – 2,2 Mio. €	2030 CAPEX -
Wirtschaft- licher Rahmen	▶ Rangierloks haben eine lange Betriebsdauer von meist über 50 Jahren. Innerhalb der Zeitspanne können die Loks an aktuelle Anforderungen angepasst werden oder über Retrofitting höhere Motorleistung oder gänzlich andere Antriebssysteme bekommen. Hier ist zu prüfen, ob bestehende Lokomotiven auf Brennstoffzelle oder Batterie umgerüstet werden können bzw. diese Optionen bereits bei der Anschaffungs-Planung neuer Triebwagen zu berücksichtigen ist. ▶ Ob die Brennstoffzelle oder die Batterie die wirtschaftlich sinnvollere Alternative ist, ist stark abhängig von den Einsatzbedingungen der Loks (Flottengröße, Kraftstoff-/Stromkosten, verfügbare Flächen für Infrastruktur) und den lokalen Gegebenheiten (z.B. Streckenlänge, Topographie). Hier ist eine fallspezifische Untersuchung zu empfehlen. ▶ Drei Faktoren sind im Besonderen relevant für die Eignung der Brennstoffzelle in Rangierloks: 1. Rangierloks sollten stark ausgelastet sein, also geringe Leerlaufzeiten aufweisen, und über längere Strecken eingesetzt werden. Lange Wartezeiten und kurze Leistungsspitzen eignen sich bspw. für den Einsatz von Batterien. (lange Ladezeiten). 2. Eine hohe Anzahl an Brennstoffzellen-Rangierloks senkt die Kosten für die notwendige Infrastruktur. 3. Stärkung der Interoperabilität mit anderen Verkehrsträgern (z.B. Einsatz von Lastwagen, die über das Terminal angeschlossen sind, oder von Streckenlokomotiven, die die Güterwagen ausliefern).		

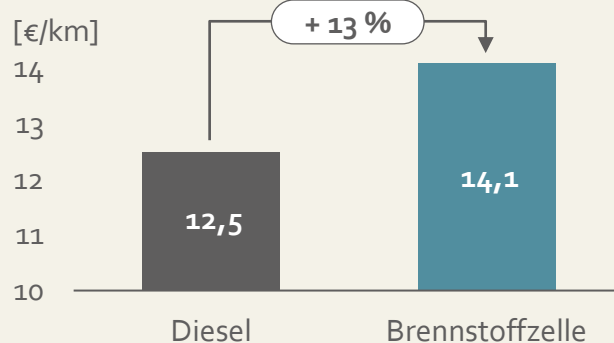
Die Brennstoffzelle wird eine wirtschaftliche Option für den Einsatz in Rangierloks.

8

Brennstoffzellen-Rangierlok (V/XI)

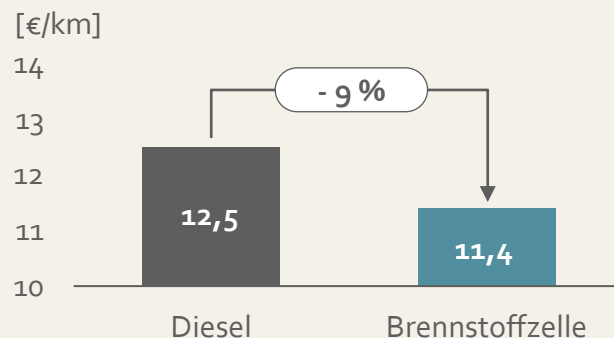
Wirtschaft-
liche
Kenn-
zahlen
(Studie 1,
2019)

TCO*-Betrachtung für Rangierloks für das Jahr 2022: **Base Case**



Die TCO-Betrachtung setzt voraus, dass Brennstoffzellen-Züge, um eine konkurrenzfähige Technologie darzustellen, hoher jährlicher Auslastung unterliegen und die Energiebeschaffungskosten niedrig (> 50 €/MWh) sind.

TCO-Betrachtung für Rangierloks für das Jahr 2022: **Optimistischer Case**



TCO-Betrachtung des optimistischen Fall nimmt die Änderungen folgender Parameter bis 2022 an:

- ▶ Abnahme der Stromkosten für die H₂-Produktion
- ▶ Erhöhung der Preise für Diesel
- ▶ Senkung der Investitionskosten der Brennstoffzellen-Rangierlok
- ▶ Senkung des Wasserstoff-Verbrauchs der Brennstoffzellen-Züge

* TCO: Total Cost of Ownership (Vollkostenbetrachtung)

Die TCO einer Rangierlok hängen stark von den Einsatzbedingungen ab.

8

Brennstoffzellen-Rangierlok (VI/XI)

3 Fallstudien mit unterschiedlichen Einsatzbedingungen

1 Hamburg-Billwerder



2 Riga, Lettland



3 Gdansk, Polen



Wirtschaft-
liche
Kenn-
zahlen
(Studie 1,
2019)

Streckenlänge	10 km (insg. 200 km/d)	100 km (insg. 100 km/d)	35 km (insg. 25 km/d)
Rangierloks	15 Stück	15 Stück	10 Stück
H ₂ -Verbrauch	0,39 kg H ₂ / km	0,49 kg H ₂ / km	0,72 kg H ₂ / km
Charakteristika	Innerstädtischer Einsatz an Hamburger Hafen-Terminals. Kurze Transportstrecke.	Einsatz in mehreren Hafen-Terminals. Häufiges An- und Ausschalten.	Rangierbahnhof mit Nähe zur Wasserstoff-erzeugenden Raffinerie (Synergiepotential).
Diesel [€/km]	10,1	20,9	32,1
Brennstoffzelle [€/km]	12,7	20,4	36,7
Batterie [€/km]	11,6	21,8	36,9
CO ₂ -Einsparung pro Jahr	1.969 Tonnen	3.350 Tonnen	339 Tonnen

Den größten Einfluss auf die TCO haben die Wasserstoff- bzw. Kraftstoffkosten.



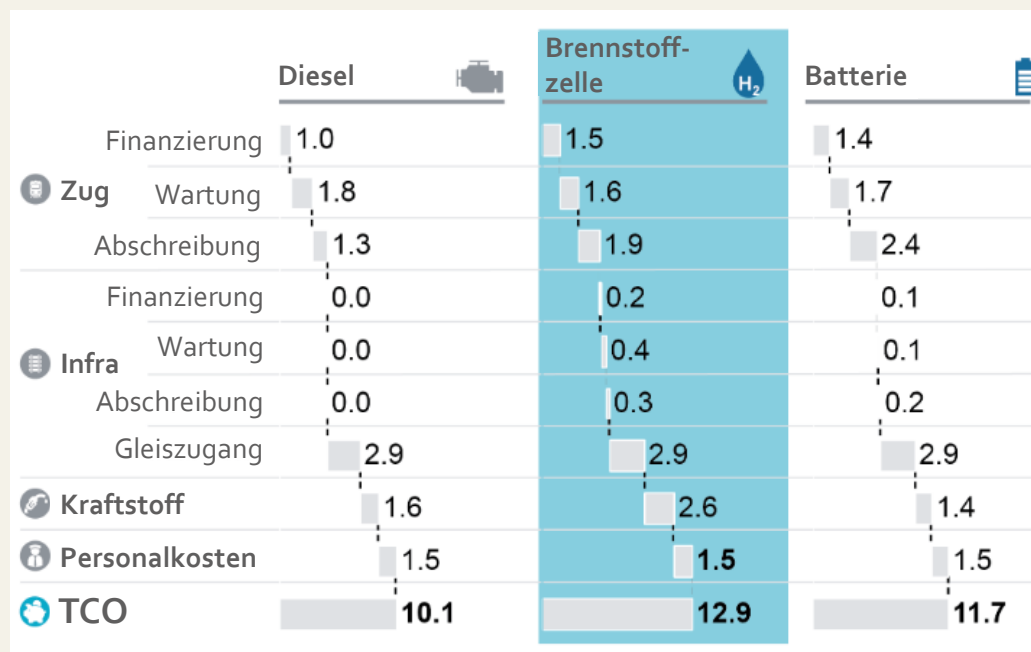
Zurück zum
Inhaltsverzeichnis

8

Brennstoffzellen-Rangierlok (VII/XI)

1 Hamburg-Billwerder: TCO-Detailbetrachtung

Wirtschaft-
liche
Kenn-
zahlen
(Studie 1,
2019)



BZ-Rangierloks eignen sich für einen kontinuierlichen Betrieb über längere Strecken.



Zurück zum
Inhaltsverzeichnis

8

Brennstoffzellen-Rangierlok (VIII/XI)

Vergleich zu Alternativtechnologien

Rangierlok mit Brennstoffzelle	Rangierlok mit Batterie	Rangierlok mit Diesel
Vorteile - Keine lokalen Emissionen - Keine Well-to-Wheel-Emissionen, wenn der Wasserstoff aus CO₂-freien Quellen bezogen wird (bspw. durch Elektrolyse-Strom aus Erneuerbaren Energien; siehe Steckbrief 3) - Kurze Betankungszeit, geeignet für langen (zeitlich, Strecke), kontinuierlichen Betrieb Nachteile - Weniger geeignet für Betrieb mit kurzer Spitzenlast und längeren Leerlaufzeiten - Hoher Platzbedarf aufgrund notwendiger Wasserstoff-Infrastruktur	Vorteile - Keine lokalen Emissionen - Keine Well-to-Wheel-Emissionen, wenn der Strom aus CO₂-freien Quellen / Erneuerbaren Energien bezogen wird - Geeignet für Betrieb mit kurzer Spitzenlast und längeren Leerlaufzeiten Nachteile - Weniger geeignet für langen (zeitlich, Strecke), kontinuierlichen Betrieb - Vergleichsweise lange Ladezyklen	Vorteile - Bewährte, vorherrschende Technologie (Vorteil bezieht sich auf die lange Lebensdauer von Rangierloks von um die 50 Jahre) - Bestehende (Betankungs-) Infrastruktur Nachteile - Hohe lokale Emissionen - Höhere Geräuschbelastung - Sinkende gesellschaftliche und politische Akzeptanz - Keine mittelfristige Perspektive (Endlichkeit der Kraftstoffe)

Die Auswahl einer Technologie ist immer vom Einsatzfall abhängig und dementsprechend spezifisch zu analysieren.

In einem Testversuch der ÖBB hat sich die Batterie ggü. der Brennstoffzelle durchgesetzt .



8

Brennstoffzellen-Rangierlok (IX/XI)

Umsetzungsbeispiel



- ▶ Die ÖBB (Österreichische Bundesbahn) und die HET Verkehrstechnik GmbH haben im Jahr 2017 eine Rangierlok vorgestellt, die mit vier 600 Volt Lithium-Ionen-Batterien und einer Brennstoffzelle ausgestattet ist.
- ▶ Zum Vergleich wurde eine baugleiche Lok auf Batterie-Antrieb umgerüstet.
- ▶ Die Brennstoffzelle bzw. Batterie soll den Vortrieb für die letzte Meile ohne Oberleitung bereitstellen.
- ▶ Die Versorgung der Batteriesätze erfolgt entweder direkt von der Fahrleitung oder von der Brennstoffzelle (Leistung der Brennstoffzelle beträgt 30 kW).
- ▶ In 2019 wurde entschieden, dass sich das Batterie-Konzept in dieser Anwendung besser eignet und dieses Konzept für weitere Tests in anderen Zugklassen eingesetzt wird.

Über das NIP II können BZ-Loks mit bis zu 40 % der Investitionskosten gefördert werden.



Zurück zum
Inhaltsverzeichnis

8

Brennstoffzellen-Rangierlok (X/XI)

Förderung (I/II)



Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP II)

Bundes-Förderung: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur

- ▶ Zeitraum: 2016 bis 2026
- ▶ Förderbudget: 1,4 Mrd. € (für 10-Jahres-Zeitraum; ca. 60 % für die Marktaktivierung, 40 % für F&E für verschiedene Sektoren)
- ▶ Fördergegenstand:
 - „Investitionszuschüsse für: Fahrzeuge (Straße, Schiene und Wasser) und Flugzeuge, die mit einem Brennstoffzellenantrieb ausgestattet sind, und gegebenenfalls die für deren Betrieb notwendige Betankungs- und Wartungsinfrastruktur.. (...)“
 - Regierungsprogramm zur Fortsetzung des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie 2006/2016*
- ▶ Ablauf: Zur Antragseinreichung wird über einzelne befristete Calls aufgerufen, in denen die jeweiligen Förderschwerpunkte und die Rahmenbedingungen der Förderung präzisiert werden.
- ▶ Art der Zuwendung: nicht zurückzahlbarer Zuschuss; Kumulierungsverbot (für gleiche Kosten)
- ▶ Zuwendungshöhe:

„Bemessungsgrundlage für Zuwendungen sind die zuwendungsfähigen projektbezogenen Ausgaben. Dies sind diejenigen Mehrausgaben, die durch den Einsatz der geförderten innovativen Technologie gegenüber dem Einsatz konventioneller Technologie bedingt sind. Gemäß Artikel 36 AGVO können die Investitionsmehrkosten mit bis zu 40 % bezuschusst werden. KMU können im Einzelfall höhere Beihilfeintensitäten gewährt werden. (...)“

Das FCH Joint Undertaking koordiniert und fördert europaweite H2-Projekte.

8

Brennstoffzellen-Rangierlok (XI/XI)

Förderung (II/II)



Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU)

Privat-öffentliche Vereinigung aus Europäischer Kommission, Hydrogen Europe und Hydrogen Europe Research

- ▶ Mithilfe der Fördergelder aus den Programmen FP7 (Framework Programme for Research) und Horizon 2020 der Europäischen Kommission (als FCH 2 JU) werden Forschung, Demonstrations-Projekte und technologische Entwicklung mit Bezug zur Wasserstoff-Technologie gefördert.
- ▶ Für ausgeschriebene Projekte sind innerhalb von befristeten Calls die Anträge einzureichen. Die Projekt-Aufrufe müssen daher laufend hinsichtlich der Förderschwerpunkte und -summen sondiert werden (siehe auch <https://www.fch.europa.eu/page/call-2020>).

Wasserstoff-BHKW

BHKWs, die H2 als Brennstoff nutzen, sind in kleinen Stückzahlen im Einsatz.

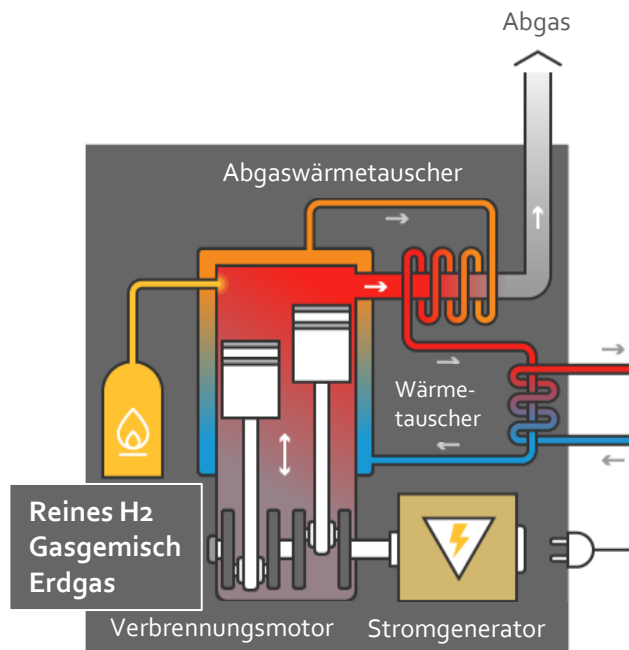
9	Wasserstoff-BHKW (I/ VII)		
Mögliche Einsatzbereiche in der Emscher-Lippe Region			Wertschöpfungsstufe
Perspektivisch in der Strom- und Wärmeversorgung (EVU, Stadtwerke)			 Erzeugung
			 Verteilung & Speicherung
			 Nutzung
Kurzbeschreibung			Muss-/Kann-Anwendung
- Ein Wasserstoff-BHKW nutzt das Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung. Es verbrennt, statt wie weit verbreitet Erdgas, reinen Wasserstoff ohne fossilen Brennstoffanteil, zur Erzeugung von Strom und Wärme. - Die einzigen zurzeit am Markt verfügbaren Modelle werden von dem Unternehmen 2g AG entwickelt (vgl. Folie III). - Die Anlagen sollen zukünftig in der Lage sein, sowohl reinen Wasserstoff, reines Erdgas oder Gasgemische als Brennstoff zu nutzen. Im Rahmen des Einsatzes eines Wasserstoff-BHKWs bei den Stadtwerken Haßfurth (vgl. Folie VII) ist vorerst nur ein „entweder-oder“-Betrieb möglich. In Zukunft soll aber auch eine stufenlose (Gas-)Mischung regelungstechnisch möglich sein.			2020 Muss ☐ ☐ ☐ Kann ☒ ☐ ☐
			2025 Muss ☐ ☐ ☐ Kann ☒ ☐ ☐
			2030 Muss ☐ ☐ ☐ Kann ☒ ☐ ☐

Analog zu einem Erdgas-BHKW wird Wasserstoff verbrannt.

9

Wasserstoff-BHKW (II/VII)

Schematische Darstellung



Technische Kennzahlen H₂-BHKW

Komponenten:

Verbrennungsmotor, Stromgenerator, Abgaswärmetauscher, Wärmetauscher

Wirkungsgrad thermisch:

41,7 – 42,3 %

Wirkungsgrad elektrisch:

37,5 – 40,5 %

Zurzeit produziert nur der Hersteller 2g Wasserstoff-BHKWs in Serienreife.

9		Wasserstoff-BHKW (III/ VII)			
Technology Readiness Level		Anbieter (Auszug) (i/ii)			
2020	 F & E	☐			2G Energy AG Die Wasserstoff-BHKWs des Anbieters 2g sind dafür ausgelegt, reinen Wasserstoff (ohne fossile Brennstoffanteile), Erdgas oder Gasmischungen (mit Erdgas oder Schwachgasen) einzusetzen. In Zukunft soll die Zugabe des Brenngases stufenlos einstellbar sein.
	 Kleinserie	☒			
	 Serienreife	☐			
2025	 F & E	☐			
	 Kleinserie	☐			
	 Serienreife	☒			
2030	 F & E	☐			
	 Kleinserie	☐			
	 Serienreife	☒			

	Leistung elektrisch (Wirkungsgrad)	Leistung thermisch (Wirkungsgrad)	Gesamtwirkungsgrad
agenitor 404c H2	115 kW (37,7 %)	129 kW (42,3 %)	80 %
agenitor 406 H2	170 kW (39 %)	183 kW (41,9 %)	80,9 %
agenitor 408 H2	240 kW (40,2 %)	250 kW (41,9 %)	82,1 %
agenitor 412 H2	360 kW (40,5 %)	371 kW (41,7 %)	82,2 %

<https://www.2-g.com/de/agenitor-75-bis-450-kw/>

Die Investitionskosten sind mit dem von Erdgas-BHKWs vergleichbar.

9

Wasserstoff-BHKW (IV/VII)

Investition und Betrieb

2020

CAPEX 1.000 €/kW_{el}

2025

CAPEX -

2030

CAPEX -

Wirtschaftlicher Rahmen

- Die Investitionen für das Wasserstoff-BHKW liegen mit knapp unter 1.000 €/kW_{el} etwa bei denen für Erdgasblockheizkraftwerke.
- Die Kosten der Vollwartung liegen für ein Wasserstoff-BHKW knapp unter 1 Ct/kWh, beim Erdgasmotor sind es 0,8 Ct/kWh. Die Kosten beziehen sich auch auf das Entwicklungsziel von 200 €/kW_{el}.
- Ab einer Wasserstoffzumischgrenze von etwa 30 % sind sinkende Emissionen beobachten.
- Im reinen Wasserstoffbetrieb entstehen keine Emissionen von CO₂ oder anderen Treibhausgasen, der Ausstoß von Stickoxid ist deutlich verringert.
- Die Motoren der Wasserstoff-BHKWs von 2g sind unempfindlich ggü. Schwefel. Damit kann auch Wasserstoff eingesetzt werden, der als Nebenprodukt in Industrieprozessen anfällt oder als Synthesegas gewonnen wird.
- Den Wirkungsgradverlust (über die gesamte Lebensdauer) gibt 2g mit weniger als zwei Prozent an.

Stickoxid-Ausstoß BHKW in Abhängigkeit vom eingesetzten Brennstoff:

[mg/m³]

500

250

0

500

- 96 %

20

Erdgas

Wasserstoff

Brennstoffzellen-BHKW weisen stark verringerte Emissionen aus.

9

Wasserstoff-BHKW (V/VII)

Vergleich zu Alternativtechnologien

Wasserstoff-BHKW

Vorteile

- ▶ Keine Treibhausgasemissionen
- ▶ Verringerte Stickoxid-Emissionen
- ▶ Je nach Technologie wird eine stufenlose Einspeisung von reinem Wasserstoff über Mischgase bis hin zu Erdgas möglich sein
- ▶ Vergleichsweise niedrige Investitionskosten (vgl. Folie IV)

Nachteile

- ▶ Technologie ist noch nicht vollends ausgereift
- ▶ Fehlende Wasserstoff-Infrastruktur

Erdgas-BHKW

Vorteile

- ▶ Ausgereifte, erprobte Technologie
- ▶ Breite Anwendung und umfangreiche Erfahrungswerte
- ▶ Flächendeckendes Erdgas-Versorgungsnetz
- ▶ Niedrige Investitionskosten (vgl. Folie IV)
- ▶ Es gibt viele Anbieter, wodurch die Bandbreite an verfügbaren Geräte-Leistungen größer ist

Nachteile

- ▶ Höhere Emissionen
- ▶ Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen oder
- ▶ Synthetischem Gas aus Methanisierung (Umwandlungsverluste)

Brennstoffzelle

Vorteile

- ▶ Hoher Wirkungsgrad (>85 %) bzw. geringerer Energieverbrauch, da eine Brennstoffzelle den direkten elektro-chemischen Weg nutzt (sinkende Energiebezugskosten)
- ▶ Deutlich geringere CO₂-Emissionen und nahezu keine Stickoxide, Schwefeloxide und Feinstaub
- ▶ Geringe Wartungskosten, da es weniger bewegliche Teile gibt
- ▶ Leiser und vibrationsfreier Betrieb

Nachteile

- ▶ Hohe Investitionskosten
- ▶ Technologie ist noch nicht in Serienfertigung und damit nicht in der Breitenanwendung erprobt

In Haßfurth wird ein Wasserstoff-BHKW mit einer Power-to-Gas-Anlage kombiniert.

9

Wasserstoff-BHKW (VI/VII)

Umsetzungsbeispiel



- ▶ In einem Projekt der Stadtwerke Haßfurth ist ein Wasserstoff-BHKW an eine bestehende Power-to-Gas-Anlage angeschlossen. Der Wasserstoff wird der PtG-Anlage über eine eigene Leitung entnommen und dem BHKW zugeführt. Der Strom wird in das Stromnetz der Stadt eingespeist, die Wärme soll über ein noch zu errichtendes Wärmenetz von einer benachbarten Malzfabrik, einer Schule sowie einem Kindergarten abgenommen werden.
- ▶ Sowohl die PtG-Anlage als auch das Wasserstoff-BHKW haben eine hohe Dynamik, und können mit dem Gesamtsystem Stromüberschüsse und Unterdeckungen aus der erneuerbaren Stromerzeugung im lokalen Bilanzkreis oder übergeordnet im Verteilnetz (Regelenergie) ausgeglichen werden.
- ▶ Das BHKW-Modul liefert eine elektrische Leistung von 140 kW_{el}.
- ▶ Zwei Gasanschlüsse sorgen dafür, dass das Aggregat mit Wasserstoff und fossilem Gas versorgt werden kann. Eine stufenlose Mischung soll im Rahmen des geförderten Projekts regelungstechnisch ermöglicht werden.
- ▶ Wechselt die Anlage in den Gasbetrieb, erhöht sich die elektrische Leistung auf 200 kW_{el}.

Das FCH Joint Undertaking koordiniert und fördert europaweite H2-Projekte.

9

Wasserstoff-BHKW (VII/VII)

Förderung (I/I)



Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU)

Privat-öffentliche Vereinigung aus Europäischer Kommission, Hydrogen Europe und Hydrogen Europe Research

- ▶ Mithilfe der Fördergelder aus den Programmen FP7 (Framework Programme for Research) und Horizon 2020 der Europäischen Kommission (als FCH 2 JU) werden Forschung, Demonstrations-Projekte und technologische Entwicklung mit Bezug zur Wasserstoff-Technologie gefördert.
- ▶ Für ausgeschriebene Projekte sind innerhalb von befristeten Calls die Anträge einzureichen. Die Projekt-Aufrufe müssen daher laufend hinsichtlich der Förderschwerpunkte und -summen sondiert werden (siehe auch <https://www.fch.europa.eu/page/call-2020>).

Brennstoffzellen-LKW von Hyundai in der Schweiz

In der Schweiz will Hyundai bis 2025 1.600 Nutzfahrzeuge in den Verkehr bringen.

10

BZ-LKW von Hyundai in der Schweiz (I/III)

Kurzbeschreibung

- ▶ Bis 2025 wird Hyundai 1.600 Brennstoffzellen-LKW auf den Schweizer Markt bringen.
 - ▶ Anfang Juli 2020 wurden die ersten zehn Fahrzeuge in die Schweiz geliefert.
- ▶ Bei dem Fahrzeug handelt es sich um den Hyundai XCIENT.
- ▶ Die Fahrzeuge werden in einem Pay-per-Use-Modell vermietet, damit die Flottenkunden nicht die hohen Anfangsinvestitionen tragen müssen. Getragen wird das Mietmodell von der Hyundai Hydrogen Mobility AG, einem Joint Venture, das von der Hyundai und dem schweizerischen Unternehmen H2 Energy gegründet worden ist.
- ▶ Sobald das Projekt in der Schweiz erfolgreich läuft, plant Hyundai den Roll-Out in anderen europäischen Ländern.
- ▶ Bis 2030 will Hyundai ein Verkaufsvolumen von insgesamt 27.000 Einheiten erreichen.

Wertschöpfungsstufe



Erzeugung



Verteilung & Speicherung



Nutzung

- ☐ Elektrolyse
- ☐ Dampfreformierung
- ☐ Pyrolyse
- ☐ H2 als Beiprodukt
- ☐ H2-Import
- ☐ Truck-Transport
- ☐ Pipeline-Transport (Beimischung)
- ☐ Pipeline-Transport (100 % H2)
- ☐ H2-Speicherung
- ☒ Mobilität
- ☐ Industrie
- ☐ Wärme
- ☐ Synthetisierung (z. B. PtL)

Das Fahrzeug hat eine Reichweite von ca. 400 Kilometern.

10	BZ-LKW von Hyundai in der Schweiz (II/III)	
Fahrzeugdaten	Hyundai XCIENT Fuel Cell	
	Motorleistung	350 kW
	Maße (L x B x H)	9.745 mm x 2.515 mm x 3.730 mm
	Brennstoffzellenleistung	190 kW (Zwei parallel geschaltete Brennstoffzellen Stacks mit je 95 kW)
	Zug-Gesamtgewicht	36 Tonnen
	Tankvolumen	32 kgH ₂
	Druckstufe	350 bar
	Reichweite	400 km
	Dauer Tankvorgang	8 – 20 Minuten

Die Fahrzeuge werden zwischen 2020 und 2025 auf die Straße gebracht.

10		BZ-LKW von Hyundai in der Schweiz (III/III)				
Status	Kategorie	 F & E  Pilot  Serie			Zeitraum	2020 bis 2025
	Phase	Planung Aufbau Betrieb				
Konsor- tium	Projekt- partner	▶ Hyundai Hydrogen Mobility AG (Joint Venture aus Hyundai Motor Company und H2 Energy)				
	Ansprech- partner	▶ Hyundai Hydrogen Mobility AG (+41 43 343 90 00)				
Finanzen	Projekt- volumen	▶ Roll-out von 1.600 Fahrzeugen auf dem Schweizer Markt bis 2025. ▶ In 2020 sollen 50 Fahrzeuge in den verkehr gebracht werden.				
	Wirtschaft- lichkeit	▶ Soll durch das sogenannte Pay-per-Use-Modell für die Kunden hergestellt werden.				
	Förderung	▶ -				

Quellenverzeichnis

Quellenverzeichnis – Seite 1

 Zurück zum
Inhaltsverzeichnis

1. NOW GmbH. Einführung von Wasserstoffbussen im ÖPNV – Fahrzeuge, Infrastruktur und betriebliche Aspekte. https://www.starterset-elektromobilitaet.de/content/1-Bausteine/5-OEPNV/now_leitfaden_einfuehrung-wasserstoffbusse.pdf.
2. Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking. Development of Business Cases for European Regions and Cities – FCH Buses. 2017.
3. Hydrogen Council. Path to hydrogen competitiveness – A cost perspective. 2020.
4. RVK (Regionalverkehr Köln GmbH). <https://www.rvk.de/projekt-null-emission/die-brennstoffzellen-hybridbusse/>. 2020.
5. ZfK (Zeitung für kommunale Wirtschaft). <https://www.zfk.de/mobilitaet/oepnv/artikel/9649a8608a92379b05d685c7f8cbb9a8/koeln-rvk-baut-bis-2022-groesste-wasserstoffbus-flotte-auf-2020-03-12/>. 2020.
6. NOW GmbH. https://www.now-gmbh.de/content/2-bundesfoerderung-wasserstoff-und-brennstoffzelle/1-foerderrichtlinien/regierungsprogramm_h2bz.pdf. 2020.
7. NOW GmbH. <https://www.now-gmbh.de/content/2-bundesfoerderung-wasserstoff-und-brennstoffzelle/1-foerderrichtlinien/foerderrichtlinie-fuer-massnahmen-der-marktaktivierung-vom-18.oktober-2017.pdf>. 2020.
8. ElektroMobilitätNRW. <https://www.elektromobilitaet.nrw/foerderprogramme/elektrobusse/>. 2020.
9. Spiegel. <https://www.spiegel.de/wirtschaft/soziales/elektrobusse-china-startet-ins-zeitalter-der-leisen-riesen-a-1211689.html>. 2020.
10. Next Mobility. <https://www.next-mobility.de/elektrobusse-im-winter-berechtigte-zweifel-a-790025/>. 2019.
11. Auto, Motor und Sport. <https://www.auto-motor-und-sport.de/nutzfahrzeug/nahverkehr-bus-antrieb-zukunft-statt-diesel-co2/>. 2019.
12. IVU traffic technologies. https://www.ivu.de/fileadmin/ivu/pdf/aktuelles/awf/2018/Votr%C3%A4ge/Montag/03_Session_E-Busse_in_der_IVU.suite/AWF2018_IVU.suite_f%C3%BCr_Elektrobusse_IVU.pdf. 2020.

Quellenverzeichnis – Seite 2

 Zurück zum
Inhaltsverzeichnis

13. FAUN Umwelttechnik GmbH & Co. KG. https://www.faun.com/produkte/alternative_antriebe/bluepower/. 2020.
14. Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking. Refuse vehicle innovation and validation in europe (REVIVE). <https://www.fch.europa.eu/project/refuse-vehicle-innovation-and-validation-europe>. 2020.
15. Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking. Development of Business Cases for European Regions and Cities – FCH Garbage trucks. 2017.
16. HECTOR (Hdrogen waste collection vehicles in north west europe). <https://www.nweurope.eu/projects/project-search/hector-hydrogen-waste-collection-vehicles-in-north-west-europe/>. 2020.
17. ADAC. <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/kaufen/elektroautos-uebersicht/>. 2021.
18. Shell Deutschland GmbH. <https://www.shell.de/autofahrer/shell-kraftstoffe/shell-fuelsave-kraftstoffe/diesel-b7.html>. 2020.
19. Brennstoffzelle versus Batterie. <https://www.elektroniknet.de/power/energiespeicher/brennstoffzelle-versus-batterie.168950.html>. 2019.
20. Clean Vehicles Directive. https://ec.europa.eu/transport/themes/urban/clean-vehicles-directive_en.
21. Wasserstoff-Lkw kurz vorm Start. <https://www.eurotransport.de/artikel/projekt-von-hyundai-in-der-schweiz-wasserstoff-lkw-kurz-vorm-start-11152159.html>. 2020.
22. Hyzon Motors. <https://hyzonmotors.com/vehicle/heavy-duty-trucks/>. 2020.
23. Wasserstoff Marsch!. <https://www.sueddeutsche.de/auto/wasserstoff-brennstoffzelle-lkw-schweiz-1.4858564>. 2020.
24. H2 Mobility GmbH. <https://h2.live/impressum/>. 2020.
25. GLC als Wasserstoff-Hybrid im Test. <https://www.autozeitung.de/mercedes-glc-f-cell-test-197455.html>. 2020.
26. Iveco baut Elektro- und Brennstoffzellen-Lkw Nikola TRE in Ulm. <https://www.handelsblatt.com/technik/forschung-innovation/nutzfahrzeughersteller-iveco-baut-elektro-und-brennstoffzellen-lkw-nikola-tre-in-ulm/25519686.html?ticket=ST-9860312-2nRechRQdoFUSHf4VHvQ-ap1>. 2020.
27. Shell Deutschland GmbH. <https://www.shell.de/energie/wende.html#vanity-aHRocHM6LY93d3cuc2hlbGwuZGUvZW5lcmdpZS11bmQtaW5ub3ZhdGlvbGt2JpbGloYWVoL3dhc3NlcnNob2ZmLmhobWw>. 2020.

Quellenverzeichnis – Seite 3

 Zurück zum
Inhaltsverzeichnis

28. E-mobil BW - Landesagentur für elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie Baden-Württemberg GmbH. Nullemissionsnutzfahrzeuge. <https://www.nweurope.eu/media/2663/2017-nfz-studie.pdf>. 2017.
29. Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking. Development of Business Cases for European Regions and Cities – FCH Heavy-duty trucks. 2017.
30. Toyota Motor corporation. <https://global.toyota/en/newsroom/corporate/32024083.html>. 2020.
31. Hyzon Motors will als Erster Brennstoffzellen-Nutzfahrzeuge produzieren. <https://www.cleantalking.de/hyzon-motors-brennstoffzellen-nutzfahrzeuge-in-serie/>. 2020.
32. Toyota Deutschland GmbH. <https://www.toyota.de/news/brennstoffzellen-lkw-toyota-kenworth>. 2019.
33. Fuel cell & hydrogen energy association. <http://www.fchea.org/in-transition/2020/4/13/update-on-heavy-duty-fuel-cell-trucks>. 2020.
34. Daimler plant BZ-Lkw mit 1.000 Kilometern Reichweite. <https://www.electrive.net/2020/09/16/daimler-plant-bz-lkw-mit-1-000-kilometern-reichweite/>. 2020.
35. Wasserstoff-Zeitalter: Daimler stellt Brennstoffzellen-Lkw vor. <https://www.swr.de/swraktuell/rheinland-pfalz/ludwigshafen/brennstoffzelle-lastwagen-daimler-100.html>. 2020.
36. H2-Share. <https://www.nweurope.eu/projects/project-search/h2share-hydrogen-solutions-for-heavy-duty-transport/>.
37. Hydrogen europe. <https://hydrogeneurope.eu/index.php/h2haul>.
38. Neuer Brennstoffzellentruck für Kalifornien. <https://www.auto-motor-und-sport.de/news/toyota-project-portal-brennstoffzellentruck-fuer-l-a/>. 2019.
39. Update für Brennstoffzellen-Lkw. <https://www.eurotransport.de/artikel/toyota-und-kenworth-update-fuer-brennstoffzellen-lkw-10744745.html>. 2019.
40. Renault joins Toyota and Mercedes with hydrogen delivery van. <https://www.bloomberg.com/news/articles/2019-10-22/renault-joins-toyota-mercedes-with-hydrogen-delivery-van>. 2019.
41. Symbio. <https://www.symbio.one/en/hydrogen-transport/#>. 2020.
42. FCEVS. <https://h2me.eu/about/fcevs/>. 2020.

Quellenverzeichnis – Seite 4

 Zurück zum
Inhaltsverzeichnis

43. Bestand in Deutschland wächst auf rund 310.000 Elektroautos. <https://www.electrive.net/2021/03/02/bestand-in-deutschland-waechst-auf-309-083-bev-pkw/>. 2021.
44. Brennstoffzelle für Kangoo Z.E. und Master Z.E.. <https://blog.renault.de/neues-von-renault-brennstoffzelle-fuer-kangoo-ze-master-ze/>. 2019.
45. Brennstoffzelle für Master und Kangoo. <https://www.autobild.de/artikel/renault-kangoo-z.e.-master-z.e.-hydrogen-2019-brennstoffzelle-elektroauto-marktstart-15864151.html>. 2019.
46. Reault bringt Brennstoffzelle in leichte Nutzfahrzeuge. <https://www.electrive.net/2019/10/22/renault-bringt-brennstoffzelle-in-leichte-nutzfahrzeuge/>. 2019.
47. Kleintransporter künftig auch mit Wasserstoff. <https://www.auto-motor-und-sport.de/tech-zukunft/alternative-antriebe/stellantis-brennstoffzellen-transporter-hydrogen-fcv-opel-vivaro-jumpy-expert/>. 2021.
48. Stellantis bringt noch 2021 BZ-Versionen von PSA-Transportern. <https://www.electrive.net/2021/04/01/stellantis-bringt-noch-2021-bz-versionen-von-psa-transportern/>. 2021.
49. Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking. Development of Business Cases for European Regions and Cities – FCH Delivery vans. 2017.
50. Shell Wasserstoff-Studie Energie der Zukunft? – Nachhaltige Mobilität durch Brennstoffzelle und H₂. https://www.shell.de/medien/shell-publikationen/shell-hydrogen-study/_jcr_content/par/toptasks_e705.stream/1497968981764/1086fe80e1b5960848a92310091498ed5c3d8424/shell-wasserstoff-studie-2017.pdf. 2017.
51. Wasserstoffautos. <https://h2.live/wasserstoffautos/>. 2021.
52. https://www.hs-karlsruhe.de/fileadmin/hska/EIT/Aktuelles/seminar_erneuerbare_energien/Sommer_2018/Folien/VortragBZTechnologieDeutschland180530.pdf. 2018.
53. GLC als Wasserstoff-Hybrid im Test. <https://www.autozeitung.de/mercedes-glc-f-cell-test-197455.html>. 2020.
54. Mercedes stoppt den GLC F-Cell. <https://www.auto-motor-und-sport.de/tech-zukunft/mercedes-glc-f-cell-brennstoffzelle-aus/>. 2020.

Quellenverzeichnis – Seite 5

 Zurück zum
Inhaltsverzeichnis

55. Mercedes GLC F-Cell wird eingestellt: Daimler stoppt offenbar Brennstoffzellen-Entwicklung für Pkw.
<https://www.automobilwoche.de/article/20200427/NACHRICHTEN/200429929/mercedes-glc-f-cell-wird-eingestellt-daimler-stoppt-offenbar-brennstoffzellen-entwicklung-fuer-pkw>. 2020.
56. Es gurgelt und summt: Testfahrt im neuen Toyota Mirai. <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/toyota/toyota-mirai/>. 2020.
57. Strompreis in Deutschland: Herkunft, Zusammensetzung, Einsparungen. <https://www.cozonline.de/energie-sparen/strom-sparen/strom-sparen-stromspartipps/strompreis/>.
58. 3er Touring im Test ein Allround-Talent. <https://www.autozeitung.de/bmw-320d-touring-test-197420.html>. 2019.
59. 3er Touring Sport Line. <https://www.cluno.com/de/portfolio/bmw-3er-touring-sport-line-250/>.
60. <https://www.drivek.de/vergleiche/toyota-camry/tesla-model-3/>
61. Durchschnittlicher Preis für Dieselmotoren in Deutschland in den Jahren 1950 bis 2021 . Statista.
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/779/umfrage/durchschnittspreis-fuer-dieselmotoren-seit-dem-jahr-1950/>. 2020.
62. Tesla Model 3 im Test: Beeindruckend – trotz einiger Schwächen. <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/tesla/tesla-model-3/>. 2021.
63. Shell PKW-Szenarien bis 2040 – Fakten, Trends und Perspektiven für Auto-Mobilität.
https://www.shell.de/promos/media/shell-passenger-car-scenarios-to-2040/_jcr_content.stream/1455700315660/c4968e7f206e1dfe72caf825eceb1fb472487d4e/shell-pkw-szenarien-bis-2040-vollversion.pdf.
64. Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking. Development of Business Cases for European Regions and Cities – FCH Cars. 2017.
65. Brennstoffzellen: Auch Berliner Polizei testet Wasserstoff-Auto.
<https://www.heise.de/newsticker/meldung/Brennstoffzellen-Auch-Berliner-Polizei-testet-Wasserstoff-Auto-4651829.html>. 2020.

Quellenverzeichnis – Seite 6

66. So funktioniert der neue Umweltbonus. Die Bundesregierung. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/umweltbonus-1692646>.
67. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/FAQ/Elektromobilitaet/faq-elektromobilitaet-01.html>.
68. Förderung für Elektroautos: Hier gibt es Geld. <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/kaufen/foerderung-elektroautos/>. 2021.
69. Power-to-Gas. <https://www.energas-gmbh.de/power-to-gas-wasserstoff/>. 2019.
70. Elektrolyse – Die Schlüsseltechnologie für Power-to-X. <https://www.ffe.de/publikationen/892-elektrolyse-die-schlueseltechnologie-fuer-power-to-x>.
71. Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe. Agora Verkehrswende. https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/Die_Kosten_synthetischer_Brenn-_und_Kraftstoffe_bis_2050/Agora_SynCost-Studie_WEB.pdf. 2018.
72. Wasserelektrolyse an der Schwelle zur großskaligen Industrialisierung – Trends und Herausforderungen bis 2030. Siemens und Fraunhofer ISE. https://www.energietaeche.de/fileadmin/user_upload/2019/Vortraege/4.02_Smolinka_Dickschas_Wasserelektrolyse.pdf. 2019.
73. H2future. <https://www.h2future-project.eu/technology>.
74. McPhy. <https://mcphy.com/de/anlagen-dienstleistungen/elektrolyseure/>.
75. Nel ASA. <https://nelhydrogen.com/water-electrolysers-hydrogen-generators/>.
76. Ideal für Power-to-X. <https://igas-energy.de/produkte/power-to-x>.
77. Sunfire GmbH. <https://www.sunfire.de/de/wasserstoff>.
78. Studie IndWEde – Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland: Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und Wärme. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. <https://www.dvv-info.de/wp-content/uploads/2019/06/NOW-Elektrolysestudie-2018.pdf>. 2018.
79. Zapf. Stromspeicher und Power-to-Gas im deutschen Energiesystem. 2017.

Quellenverzeichnis – Seite 7

 Zurück zum
Inhaltsverzeichnis

80. Dena – Deutsche Energie-Agentur. Heutige Einsatzgebiete für Power Fuels – Factsheets zur Anwendung on klimafreundliche erzeugtem synthetischen Energieträgern.
https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2019/181123_dena_PtX-Factsheets.pdf. 2018.
81. Study on early business cases for H₂ in energy storage and more broadly power to H₂ applications. Fuel cells and hydrogen joint undertaking. https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/P2H_Full_Study_FCHJU.pdf. 2017.
82. H₂FUTURE: Weltweit größte „grüne“ Wasserstoffpilotanlage erfolgreich in Betrieb gegangen.
<https://www.voestalpine.com/group/de/media/presseaussendungen/2019-11-11-h2future-weltweit-groesste-gruene-wasserstoffpilotanlage-erfolgreich-in-betrieb-gegangen/>. 2019.
83. NOW GmbH. <https://www.now-gmbh.de/de/aktuelles/presse/wasserstoff-treibt-saubere-stapler-an>. 2019.
84. Brennstoffzellen-Technik – STILL Fuel Cell. <https://www.still.de/loesungskompetenz/innovationen-made-by-still/brennstoffzellen-technik.html>.
85. Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking. Development of Business Cases for European Regions and Cities – FCH Material Handling equip. 2017.
86. Linde Material Handling. [https://www.linde-mh.de/de/Produktfinder/?offerType=new&sorting\[field\]=productType&sorting\[direction\]=ASC&driveTypes\[\]=3341&productTypes\[\]=2377](https://www.linde-mh.de/de/Produktfinder/?offerType=new&sorting[field]=productType&sorting[direction]=ASC&driveTypes[]=3341&productTypes[]=2377).
87. Warum Staplerflotten künftig mit Wasserstoff fahren. <https://www.produktion.de/technik/warum-staplerflotten-kuenftig-mit-wasserstoff-fahren-106.html>. 2019.
88. Mit Wasserstoff in die Zukunft. <https://www.linde-mh.de/de/Ueber-uns/Innovationen-von-Linde/Brennstoffzellen.html>.
89. BMW nimmt in Leipzig 70 Wasserstoff-Routenzüge in Betrieb.
<https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/To288005DE/bmw-nimmt-in-leipzig-70-wasserstoff-routenzuege-in-betrieb?language=de>. 2018.
91. NOW GmbH. <https://www.now-gmbh.de/sektoren-themen/strom/stationaere-stromversorgung/>.

Quellenverzeichnis – Seite 8

 Zurück zum
Inhaltsverzeichnis

92. <https://www.viessmann.de/de/wohngeshaeude/kraft-waerme-kopplung/mikro-kwk-brennstoffzelle/vitovvalor.html>.
93. <https://www.senertec.de/wp-content/uploads/2019/05/4797-313-003-Infoblatt-Dachs-o.8.pdf>.
94. https://www.solidpower.com/fileadmin/user_upload/pages/Logos_materialien/SOLIDpower_BlueGEN_Brochure_DE_web.pdf.
95. Advancing Europe's energy systems. Fuel cells and hydrogen joint undertaking.
https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/FCHJU_FuelCellDistributedGenerationCommercialization_o.pdf. 2015.
96. KfW. [https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-\(Inlandsf%C3%B6rderung\)/PDF-Dokumente/6000003811_M_433_Brennstoffzelle.PDF](https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-(Inlandsf%C3%B6rderung)/PDF-Dokumente/6000003811_M_433_Brennstoffzelle.PDF).
97. <https://www.stadtwerke-karlsruhe.de/de/pk/dienstleistungen/meine-brennstoffzellenheizung.php>.
98. <https://www.erdgas-suedwest.de/zuhaus/brennstoffzellenheizung>.
99. Weltpremiere: Alstoms Wasserstoff-Züge starten im öffentlichen Linienverkehr in Niedersachsen.
<https://www.alstom.com/de/press-releases-news/2018/9/weltpremiere-alstoms-wasserstoff-zuege-starten-im-oeffentlichen>.
100. Study on the use of fuel cells and hydrogen in the railway environment. Fuel cells and hydrogen joint undertaking.
https://shift2rail.org/wp-content/uploads/2019/05/Study-on-the-use-of-fuel-cells-and-hydrogen-in-the-railway-environment_final.pdf. 2019.
101. <https://www.bnsf.com/communities/environmental/fuel.html>.
102. Neumarkter Firma rüstet ÖBB-Lok auf Wasserstoffantrieb um. <https://www.sn.at/salzburg/wirtschaft/neumarkter-firma-ruestet-oebb-lok-auf-wasserstoffantrieb-um-19139422>. 2017.
103. ÖBB to rebuild electric locomotives with last-mile batteries. <https://www.railjournal.com/locomotives/obb-to-rebuild-electric-locomotives-with-last-mile-batteries/>. 2019.
104. Baustein für die Wasserstoffwirtschaft. Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung e. V.. https://www.bhkw-infozentrum.de/beispiele/bhkw_des_monats_10_2019.pdf.
105. <https://heizung.de/bhkw/funktionsweise/>.

Quellenverzeichnis – Seite 9

- 106. <https://www.2-g.com/de/agenitor-75-bis-450-kw/>.
- 107. <https://www.stwhas.de/portfolio-item/wasserstoff-bhkw/>.
- 108. <https://www.2-g.com/de/wasserstoff/>.
- 109. Hyundai liefert erste H₂-Lkw in die Schweiz. <https://www.electrive.net/2020/07/06/hyundai-liefert-erste-h2-lkw-in-die-schweiz/>. 2020.
- 110. <https://hyundai-hm.com/>.
- 111. Hyundai liefert erste Brennstoffzellen-Lkw in Europa aus. <https://www.automobil-industrie.vogel.de/hyundai-liefert-erste-brennstoffzellen-lkw-in-europa-aus-a-947638/>. 2020.
- 112. Brennstoffzellen-Lkw für die Schweiz. <https://www.auto-motor-und-sport.de/tech-zukunft/alternative-antriebe/hyundai-xcient-lkw-brennstoffzelle-wasserstoff/>. 2020.