

# Wasserstoff und Brennstoffzellen: Antworten auf wichtige Fragen





# **Wasserstoff und Brennstoffzellen: Antworten auf wichtige Fragen**

AUTOR

Dr. Oliver Ehret



**INHALT****SEITE****1. Technologieüberblick Wasserstoff und Brennstoffzellen** **8–16**

- Frage 1: Was ist Wasserstoff und wie wird er im Verkehr und in anderen Wirtschaftsbereichen genutzt? 9
- Frage 2: Welche Arten von Brennstoffzellen gibt es und wofür sind sie besonders geeignet? 10–11
- Frage 3: In welchen Bereichen der Mobilität werden Brennstoffzellen eingesetzt? 11–12
- Frage 4: Können Brennstoffzellen bereits die Batterien von Gabelstaplern und anderen Flurförderzeugen ersetzen? 12–13
- Frage 5: Entwickelt sich der Schienenbereich zu einem wirtschaftlich tragfähigen Einsatzbereich für Wasserstoff? 13–14
- Frage 6: Welche Einsatzfelder für Brennstoffzellen gibt es im stationären Bereich? 14–15
- Frage 7: Lassen sich verschiedene Wirtschaftssektoren durch Wasserstoff und Brennstoffzellen koppeln? 15–16

**2. Brennstoffzellen im Straßenverkehr** **17–28**

- Frage 8: Wie sind Brennstoffzellenfahrzeuge aufgebaut und in welchen Fahrzeugklassen werden Brennstoffzellen eingesetzt? 18
- Frage 9: Wo liegen die Vorteile von Brennstoffzellenantrieben im Allgemeinen und für bestimmte Fahrzeugklassen? 19–20
- Frage 10: Welche Brennstoffzellenfahrzeuge werden bereits heute und in naher Zukunft am Markt angeboten? 20–22
- Frage 11: Gibt es einen generellen Trend zur Kommerzialisierung von Brennstoffzellenfahrzeugen? 22–23
- Frage 12: Wie ist es um die Marktreife von Brennstoffzellenbussen und -Lastkraftwagen bestellt? 23–24
- Frage 13: Sind Brennstoffzellenfahrzeuge technisch ausgereift? 24–25
- Frage 14: Welche Hürden verbleiben für die Kommerzialisierung und wie werden sie angegangen? 25
- Frage 15: Wie ist es um die Umweltfreundlichkeit von Brennstoffzellenfahrzeugen bestellt? 26–27
- Frage 16: Sind Brennstoffzellenfahrzeuge Teil der Elektromobilität? 28

**3. Wasserstoff und Infrastruktur für den Straßenverkehr** **29–41**

- Frage 17: Wie wird Wasserstoff als Kraftstoff für den Straßenverkehr hergestellt? 30–32
- Frage 18: Wie wird Wasserstoffkraftstoff verteilt? 32
- Frage 19: Was sind die Zielsetzungen des Energiekonzepts im Verkehrsbereich und inwieweit wurden sie bislang erreicht? 33

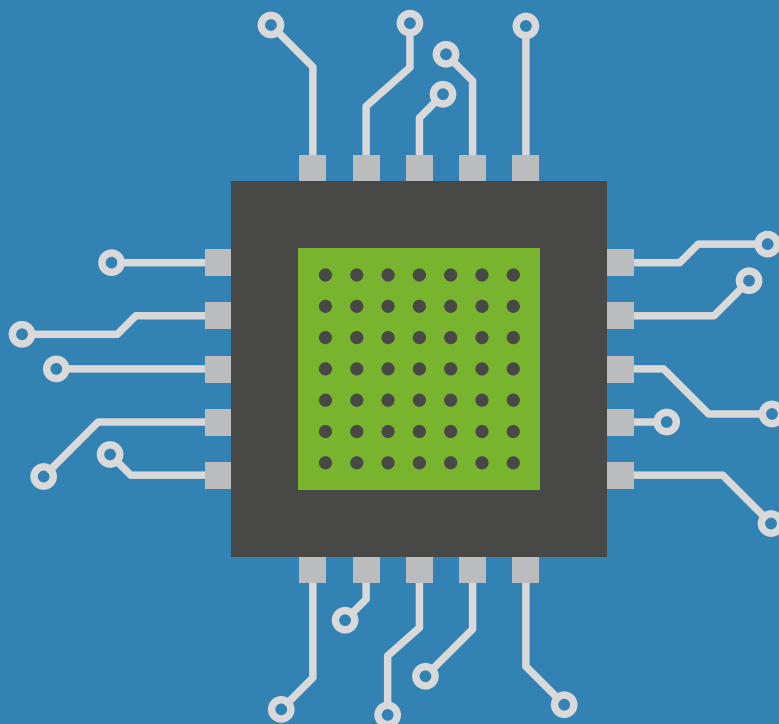
	<b>SEITE</b>
Frage 20: Welche ökologischen Folgen hätte ein breiter Einsatz von Wasserstoff in Deutschland und global?	34
Frage 21: Wie wurde der Grundstock an Betankungsinfrastruktur für Brennstoffzellenfahrzeuge in Deutschland geschaffen?	35
Frage 22: Werden erneuerbare Energien für die Herstellung von Wasserstoff genutzt?	35–36
Frage 23: Wie erfolgt der Aufbau kommerzieller Wasserstoffinfrastruktur im Rahmen von H <sub>2</sub> MOBILITY?	36–39
Frage 24: Wie hoch sind die Kosten des Aufbaus einer kommerziellen Wasserstoffinfrastruktur?	40–41
<b>4. Wasserstoff und Brennstoffzellen im internationalen Vergleich</b>	<b>42–47</b>
Frage 25: Wie und mit welchem Ergebnis werden Wasserstoff und Brennstoffzellen für den Verkehr in Deutschland gefördert?	43–44
Frage 26: Wie ist es um die Technologieförderung und wettbewerbliche Positionierung der EU bestellt?	44
Frage 27: Wie bedeutsam sind Kalifornien und die USA als Markt für Brennstoffzellen und Wasserstoff?	44–45
Frage 28: Was hat Japan als erfolgreicher Wettbewerber erreicht und wohin geht die Reise?	45
Frage 29: Etabliert sich Südkorea als ein führender Technologiestandort?	45
Frage 30: Entsteht mit China ein neues Schwergewicht für Wasserstoff und Brennstoffzellen?	46
Frage 31: Wie ist Deutschland im internationalen Vergleich aufgestellt?	47
<b>5. Sektorenübergreifender Einsatz von Wasserstoff</b>	<b>48–53</b>
Frage 32: Was versteht man unter Sektorenkopplung und welchen Beitrag kann Wasserstoff dazu leisten?	49
Frage 33: Wie könnte eine Sektorenkopplung mittels Wasserstoff und Brennstoffzellen konkret aussehen?	50–51
Frage 34: Welche Synergieeffekte können durch die Sektorenkopplung mit Wasserstoff erschlossen werden?	51–52
Frage 35: Welche Projekte zur sektorenübergreifenden Wasserstoffnutzung gibt es in Deutschland?	52–53
<b>6. Zusammenfassung</b>	<b>54–56</b>
Abkürzungsverzeichnis	57



# 1. Technologieüberblick

## Wasserstoff und Brennstoffzellen

Der erste Themenkomplex des vorliegenden Kompendiums gibt einen einführenden Überblick zu Wasserstoff und Brennstoffzellen. Die wichtigsten Eigenschaften und Anwendungsgebiete der Technologien werden als Grundlage für die detaillierte Diskussion der Themenkomplexe 2 bis 5 vorgestellt. Zudem werden verschiedene mobile und stationäre Einsatzfelder betrachtet, die außerhalb des für dieses Kompendium zentralen Bereichs des Straßenverkehrs liegen.





## Frage 1: Was ist Wasserstoff und wie wird er im Verkehr und in anderen Wirtschaftsbereichen genutzt?

Wasserstoff ist ein chemisches Element und tritt in der Natur meist in gebundener Form auf: Einzelne Wasserstoffatome verbinden sich zu Molekülen und reagieren dann in der Regel mit Sauerstoff zu Wasser. Die Siedetemperatur von Wasserstoff ist mit  $-252\text{ °C}$  extrem niedrig und reiner Wasserstoff, wie er z. B. für die Betankung von Brennstoffzellenfahrzeugen (Fuel Cell Electric Vehicles: FCEVs) verwendet wird, tritt bei Umgebungstemperatur als Gas auf. Bezogen auf das Gewicht ist die Energiedichte von Wasserstoff sehr hoch, bezogen auf das Volumen jedoch gering. Für die Nutzung als Kraftstoff muss Wasserstoff daher hoch verdichtet werden, was einerseits die Energiebilanz verschlechtert, andererseits aber hohe Fahrzeugreichweiten ermöglicht. Wasserstoff kann mit einer Vielzahl von Verfahren unter Nutzung fossiler wie auch erneuerbarer Energien (EE) hergestellt werden. Während der Großteil des weltweit verwendeten Wasserstoffs bis heute „fossil“ produziert wird, gewinnt die Herstellung auf Basis Erneuerbarer im Sinne des Klimaschutzes stark an Bedeutung. Wasserstoff kann gasförmig, flüssig oder in Metallen gebunden zuverlässig gespeichert werden.<sup>1</sup>

Wasserstoff wird seit über 100 Jahren in großen Mengen in verschiedenen Industriezweigen sicher genutzt und kommt beispielsweise für die Entschwefelung konventioneller Kraftstoffe in Raffinerien zum Einsatz. Seit vor etwa 20 Jahren erstmals ernsthafte Anstrengungen zur Entwicklung und zukünftigen Markteinführung von FCEVs unternommen wurden, gewinnt Wasserstoff als Kraftstoff an Bedeutung. Heute bietet eine Reihe deutscher und internationaler Kraftfahrzeughersteller ausschließlich mit reinem Wasserstoff betankte FCEVs an. Weltweit produzieren Unternehmen Personenkraftwagen (Pkw), Busse und andere Fahrzeuge für den kommerziellen Verkauf und für Demonstrationsprojekte (siehe Frage 10). Wasserstoff kommt auch in Gabelstaplern, Schienenfahrzeugen, Schiffen und Flugzeugen mit Brennstoffzellenantrieben oder -aggregaten zum Einsatz. Ebenso hat Wasserstoff in der stationären Energieversorgung, z. B. mit Brennstoffzellen-Heizgeräten und Anlagen zur unterbrechungsfreien Stromversorgung, seinen Platz gefunden.<sup>2</sup> Da Wasserstoff sowohl mobil wie auch stationär eingesetzt werden kann, erlangt er auch als Medium der als Sektorenkopplung bekannten Verbindung verschiedener Wirtschaftssektoren zunehmende Bedeutung (Fragen 7 und 32 bis 35).

<sup>1</sup> Eine empfehlenswerte Einführung in den Themenkomplex bietet: Adolf, J., Arnold, K., Balzer, C., Fischedick, M., Louis, J., Pastowski, A., Schabla, U. und Schüwer, D.: Shell Wasserstoff-Studie: Energie der Zukunft? Nachhaltige Mobilität durch Brennstoffzelle und  $\text{H}_2$ , Hamburg 2017: Shell Deutschland Oil GmbH, Auch der Deutsche Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband (DWW) informiert auf [www.dww-info.de](http://www.dww-info.de) zu Grundlagen und aktuellen Entwicklungen, Alle Verweise auf im Internet hinterlegte Quellen sind zum Zeitpunkt der Veröffentlichung des vorliegenden Kompendiums aktuell. Um den Abruf der Quellen zu gewährleisten, müssen etwaige bei einer Trennung der URL in den Fußnoten entstehende Leerzeichen und nach den URLs gesetzte Punkte entfernt werden.

<sup>2</sup> Die Websites der Nationalen Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie ([www.now-gmbh.de](http://www.now-gmbh.de)) und des Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking ([www.fch.europa.eu](http://www.fch.europa.eu)) berichten über F&E- und Demonstrationsprojekte sowie politische Entwicklungen in Deutschland und der EU.

## Frage 2: Welche Arten von Brennstoffzellen gibt es und wofür sind sie besonders geeignet?

Zu den wichtigsten Brennstoffzellenarten gehören die Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzelle (Proton Exchange Membrane Fuel Cell: PEMFC) und die oxidkeramische Brennstoffzelle (Solid Oxide Fuel Cell: SOFC). PEM-Brennstoffzellen weisen die weltweit mit Abstand größten Verkaufszahlen aller Arten von Brennstoffzellen auf und sind die bei stationären wie auch mobilen Anwendungen eindeutig dominierende Technologie. SOFCs haben sich hinsichtlich Absatzzahlen als zweitwichtigster Brennstoffzellentyp etabliert und sind v. a. im stationären Bereich von Bedeutung.<sup>3</sup> Neben der PEMFC und der SOFC gibt es weitere Brennstoffzellenarten, die hier aber nicht berücksichtigt werden.

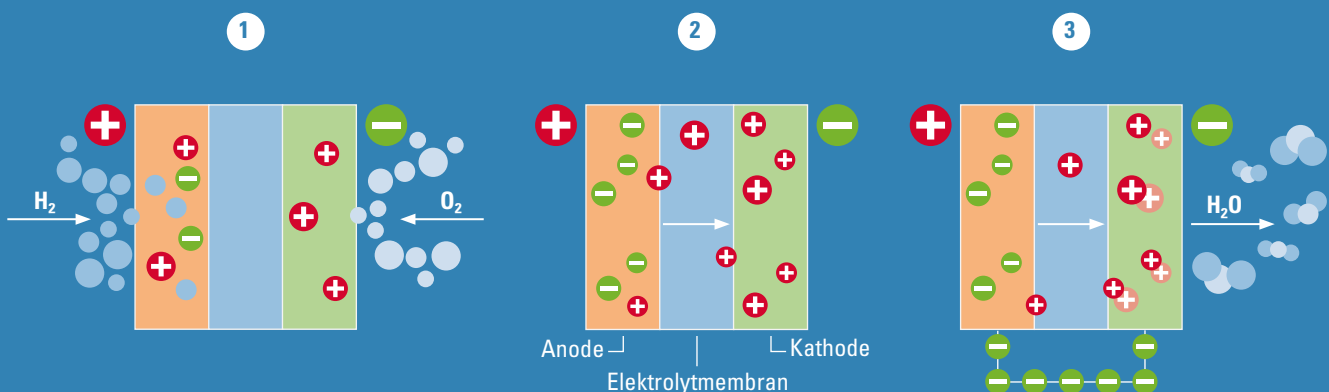
<sup>3</sup> Lehner, S. und Hart, D.: BZ-Markt: Transportbereich wächst rasant: Fuel Cell Industry Review von E4tech, in: HZwei: Das Magazin für Wasserstoff und Brennstoffzellen, 17. Jahrgang, 2017, Heft 2, S. 45–47

<sup>4</sup> Bildquelle: [cleanenergypartnership.de/fileadmin/Assets/user\\_upload/CEP\\_Erklaerblatt.pdf](https://cleanenergypartnership.de/fileadmin/Assets/user_upload/CEP_Erklaerblatt.pdf)

Die untenstehende Abbildung stellt die Funktionsprinzipien einer in FCEVs verbauten PEM-Brennstoffzelle dar (weiterführende Angaben zur Integration in Fahrzeugen finden sich unter Frage 8).<sup>3</sup> Die Brennstoffzellen sind auf sehr reinen Wasserstoff angewiesen und wandeln diesen durch Reaktion mit Luftsauerstoff in Gleichstrom für den Betrieb von Elektromotoren oder anderen Aggregaten um. Lokale Emissionen, wie sie z. B. beim Betrieb von Verbrennungsmotoren entstehen, fallen dabei nicht an.

## Die Brennstoffzelle

Das Prinzip der Brennstoffzelle: Die Brennstoffzelle ist ein elektromechanischer Stromerzeuger. Aus Wasserstoff werden Strom, Wärme und Wasser.



- 1 Auf der Anoden-Seite wird Wasserstoff eingeleitet und auf der Kathoden-Seite Umgebungsluft. An der Anode wird der molekulare Wasserstoff ( $H_2$ ) in Wasserstoffkerne ( $H^+$ ) und Elektronen aufgespalten.
- 2 Die  $H^+$  wandern durch die Elektrolytmembran, die nur für sie durchlässig ist, auf die Seite des Sauerstoffs. Die Elektronen wandern von der Anode durch einen elektrischen Leiter zur Kathode.
- 3 Dieser Stromfluss treibt den Elektromotor an. Auf der Kathoden-Seite verbinden sich Sauerstoff, Elektronen und  $H^+$ -Ionen zu  $H_2O$ , also Wasser.

PEM-Brennstoffzellen weisen einige gegenüber anderen Brennstoffzellentypen entscheidende Vorteile auf: Zunächst verfügen sie über eine hohe Leistungsdichte und können damit kompakt in Fahrzeugen – und anderswo – verbaut werden. Die für PEM-Brennstoffzellen typischen Betriebstemperaturen von etwa 80 °C sind einerseits gut beherrschbar und können andererseits Wärme für die Fahrzeugbeheizung zur Verfügung stellen. Technisch wichtig ist auch die hohe Lastflexibilität von PEM-Brennstoffzellen, da dadurch Lastwechsel wie z. B. beim Beschleunigen oder Verlangsamten von FCEVs gut bewältigt werden können.

Die Brennstoffzellen haben sich in einer Vielzahl von Anwendungen bewährt und sind technisch reif und zuverlässig. Wie andere Brennstoffzellenarten auch zeichnen sich PEM-Brennstoffzellen durch eine hohe Energieeffizienz aus. Aufgrund der besonderen Eignung für mobile Anwendungen werden heute in FCEVs aller Art nahezu ausschließlich PEM-Brennstoffzellen verbaut. Aber auch bei stationären Anwendungen, z. B. Brennstoffzellenaggregaten mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) für den Hausgebrauch, kommen überwiegend PEM-Brennstoffzellen zum Einsatz. Mit ausschlaggebend dafür ist die Tatsache, dass PEM-Brennstoffzellen die höchsten Kostensenkungspotenziale aller Brennstoffzellentypen aufweisen. Langfristig werden Verbrennungsmotoren vergleichbare Produktionskosten für PEM-Brennstoffzellen als erreichbar angesehen. Aktuell sind Brennstoffzellen aber noch deutlich teurer als Verbrennungsmotoren.<sup>5</sup>

SOFCs sind technologisch grundsätzlich anders aufgebaut als PEM-Brennstoffzellen. Sie arbeiten mit Temperaturen von bis zu 1.000 °C und sind für konstanten Betrieb ausgelegt. Dies steht dem Einsatz in Fahrzeugen entgegen, entspricht aber den Anforderungen stationärer Anwendungen. Vorteilhaft gegenüber der PEM-Technologie sind die höhere Effizienz und Lebensdauer. Insbesondere benötigen SOFCs keinen reinen Wasserstoff, sondern können mit Erdgas betrieben werden. Dieser Brennstoff ist breit verfügbar und lässt sich daher einfach bereitstellen. SOFCs kommen zumeist in KWK-Anlagen zum Einsatz und produzieren neben Strom auch Wärme.<sup>6</sup>

<sup>5</sup> [www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapHydrogenandFuelCells.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapHydrogenandFuelCells.pdf)

<sup>6</sup> [www.h2bz-hessen.de/mm/mm001/Stationre\\_BZ-Anwendungen\\_WEB.pdf](http://www.h2bz-hessen.de/mm/mm001/Stationre_BZ-Anwendungen_WEB.pdf)

### Frage 3: In welchen Bereichen der Mobilität werden Brennstoffzellen eingesetzt?

Weltweit und in Deutschland erfolgt der Transport von Personen und Gütern weit überwiegend durch verbrennungsmotorische Pkw, Busse und Lastkraftwagen (Lkw). Mit diesen Fahrzeugtypen sind die wichtigsten Märkte benannt, in denen Brennstoffzellen konventionelle Antriebe ersetzen können. Neben der Größe potenzieller Märkte beeinflussen vielfältige technische und wirtschaftliche Faktoren die Innovationsaktivitäten relevanter Akteure und damit den tatsächlichen Markteintritt von FCEVs. Das potenziell bei Weitem wichtigste Einsatzfeld für Brennstoffzellen in der Mobilität sind Pkw, da diese klar die weltweiten Fahrzeugmärkte dominieren.

Bislang wird der breite Markteintritt aber noch von hohen Kosten und unzulänglicher Betankungsinfrastruktur gehemmt. Brennstoffzellenbetriebene Stadtbusse gewinnen derzeit rasch an Bedeutung, da Städte weltweit Emissionen drastisch verringern müssen und die Infrastrukturanforderungen vergleichsweise gering sind. Auch brennstoffzellenbetriebene Lkw verschiedener Gewichtsklassen gelten mittlerweile als ernst zu nehmende Optionen und spielen die Vorteile hoher möglicher Reichweiten und Fahrzeuggewichte aus. Über diese Fahrzeugarten wird im nächsten Themenkomplex ausführlich berichtet.

Die Märkte für Flurförderzeuge und Schienenfahrzeuge sind deutlich kleiner als die oben beschriebenen Marktsegmente des Straßenverkehrs. Dennoch sind sie bereits heute kommerziell relevant, da sie unmittelbare operative und wirtschaftliche Vorteile bieten. Flurförderzeuge und Schienenfahrzeuge werden nachfolgend diskutiert. Auch Schiffe und Flugzeuge zählen zu den für Brennstoffzellen interessanten Anwendungsfeldern und werden diesbezüglich in Forschungs- und Entwicklungs- (F&E) sowie Demonstrationsprojekten untersucht. Da die Kommerzialisierung entsprechender Technologien aber noch nicht absehbar ist, unterbleibt hier eine weiterführende Betrachtung.

## Frage 4: Können Brennstoffzellen bereits die Batterien von Gabelstaplern und anderen Flurförderzeugen ersetzen?

Unter Flurförderzeugen werden nicht schienenengebundene Fahrzeuge für den Transport von Material und Waren innerhalb von Unternehmen verstanden. Zumeist handelt es sich um Gabelstapler und Schlepper, die vorwiegend in geschlossenen Räumen, zum Teil aber auch im Freien, zum Einsatz kommen. Statt der zumeist verwendeten Batterien können bei gebäudeintern eingesetzten Flurförderzeugen auch Brennstoffzellen die Antriebsleistung bereitstellen und bieten für gewisse Anwendungsfälle deutliche Vorteile. Sowohl Batterie- als auch Brennstoffzellen-Flurförderzeuge sind lokal schadstoffemissionsfrei und geräuscharm – beides ist aus Gesundheitsgründen unerlässlich. Allerdings entfallen bei Brennstoffzellen-Flurförderzeugen lange Ladezeiten bzw. ein Austausch entladener Batterien als Voraussetzung eines länger dauernden Betriebs; stattdessen ermöglicht eine höchstens dreiminütige Wasserstoffbetankung einen weitgehend unterbrechungsfreien Einsatz. Gerade bei intensiver Nutzung im Mehrschichtbetrieb bietet dies operative und wirtschaftliche Vorteile.<sup>7</sup>

<sup>7</sup> Adolf, J. et al.: Shell Wasserstoff-Studie (Fußnote 1)

Brennstoffzellen-Flurförderzeuge haben eine sehr hohe technische Reife erreicht und sich seit Jahren als frühkommerzielle Produkte bewährt. In den Vereinigten Staaten von Amerika sind aktuell rund 18.500 Brennstoffzellen-Flurförderzeuge im

Einsatz, etwa 500 weitere werden in anderen Ländern betrieben. Damit weisen Flurförderzeuge die mit Abstand größten Stückzahlen aller mobilen Brennstoffzellenanwendungen auf. Begünstigt wird dies durch den in den USA oft vorherrschenden ganzwöchentlichen Dreischichtbetrieb in großen und stark ausgelasteten Logistikzentren. Zudem werden oftmals staatliche Fördermittel in Anspruch genommen. In Europa waren im Jahr 2016 etwa 140 Brennstoffzellen-Flurförderzeuge im Einsatz. Im Rahmen des von der Europäischen Union geförderten Demonstrationsprojekts HyLIFT-EUROPE werden bis Ende 2018 weitere 200 in Dienst gestellt. Auch in Deutschland sind einige mit europäischen und nationalen Mitteln geförderte Einheiten unterwegs. In Japan sind bislang nur wenige einschlägige Aktivitäten zu verzeichnen.<sup>8</sup>

<sup>8</sup> [www.hylift-europe.eu](http://www.hylift-europe.eu)

## Frage 5: Entwickelt sich der Schienenbereich zu einem wirtschaftlich tragfähigen Einsatzbereich für Wasserstoff?

Der Schienenbereich ist ein junges, aber technisch und wirtschaftlich attraktives Anwendungsfeld für wasserstoffbetriebene Brennstoffzellen. Weltweit ist ein erheblicher Anteil des Schienennetzes nicht elektrifiziert; in Deutschland sind es um die 50 Prozent. Gleichwohl besteht ein erhebliches Interesse daran, die für Elektroantriebe typischen Umweltvorteile zu erschließen und die Nutzung von EE, hohe Energieeffizienzen sowie die deutliche Verringerung verschiedener Emissionen zu realisieren. Allerdings ist der Oberleitungsbau kostenintensiv, auf Strecken geringer Auslastung nicht wirtschaftlich und aus Gründen des Landschaftsschutzes oft nicht gewollt. Demgegenüber ermöglichen Brennstoffzellenantriebe eine Elektrifizierung von Schienenfahrzeugen unter Vermeidung der genannten Nachteile. Eine Studie stellt fest, dass brennstoffzellenbetriebene Regionalzüge heute eingesetzte Dieselmotorenzüge ohne operationelle Einschränkungen ersetzen können, v. a. da die zur Bedienung der Strecken erforderlichen Reichweiten realisiert werden. Auch die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen sind vielversprechend: Obwohl die Anschaffung von Brennstoffzellenzügen deutlich teurer ist als die von Dieselmotorenzügen, entsteht aufgrund niedrigerer laufender Infrastrukturkosten für Brennstoffzellenzüge ein Kostenvorteil von bis zu 23 Prozent.<sup>9</sup>

Angesichts dessen entwickelte der französische Schienenfahrzeugbauer Alstom eine neue Generation von Triebzügen mit Brennstoffzellenantrieb für den kommerziellen Einsatz. Der Coradia iLint wurde im Rahmen eines durch das Nationale Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) der deutschen Bundesregierung geförderten Projekts aufgebaut. Der technisch reife Triebzug kann rund 1.000 km mit einer Tankfüllung Wasserstoff zurücklegen und erreicht eine Höchstgeschwindigkeit von 140 km/h. Im September 2017 schaffte das Land Nieder-

<sup>9</sup> [www.now-gmbh.de/content/1-aktuelles/1-presse/20160701-bmvi-studie-untersucht-wirtschaftliche-rechtliche-und-technische-voraussetzungen-fuer-den-einsatz-von-brennstoffzellen-triebwagen-im-zugverkehr/broschuere\\_wasserstoff-infrastruktur-fuer-die-schiene\\_online-version.pdf](http://www.now-gmbh.de/content/1-aktuelles/1-presse/20160701-bmvi-studie-untersucht-wirtschaftliche-rechtliche-und-technische-voraussetzungen-fuer-den-einsatz-von-brennstoffzellen-triebwagen-im-zugverkehr/broschuere_wasserstoff-infrastruktur-fuer-die-schiene_online-version.pdf)

<sup>10</sup> [www.now-gmbh.de/de/aktuelles/presse/brennstoffzellen-zuege-fuer-niedersachsen](http://www.now-gmbh.de/de/aktuelles/presse/brennstoffzellen-zuege-fuer-niedersachsen)

<sup>11</sup> [www.now-gmbh.de/content/1-aktuelles/1-presse/20161214-nip-erfolgreiche-bilanz/19\\_ritter\\_alstom-freigegeben.pdf](http://www.now-gmbh.de/content/1-aktuelles/1-presse/20161214-nip-erfolgreiche-bilanz/19_ritter_alstom-freigegeben.pdf)

<sup>12</sup> [www.fuelcellindustryreview.com/archive/TheFuelCellIndustryReview2016.pdf](http://www.fuelcellindustryreview.com/archive/TheFuelCellIndustryReview2016.pdf)

<sup>13</sup> [www.h2bz-hessen.de/mm/mm001/Stationre\\_BZ-Anwendungen\\_WEB.pdf](http://www.h2bz-hessen.de/mm/mm001/Stationre_BZ-Anwendungen_WEB.pdf)

sachsen 14 Coradia-iLint-Züge für ein landeseigenes Verkehrsunternehmen an. Die Kaufverträge schließen eine 30-jährige Instandhaltung und Energieversorgung der für den regulären Bahnbetrieb vorgesehenen Züge ein. Zwei Prototypen nehmen im Frühjahr 2018 den Pilotbetrieb auf und werden an der von dem deutschen Gaseunternehmen Linde errichteten großskaligen Tankstelle mit Wasserstoff versorgt.<sup>10</sup> Bereits 2014 taten Niedersachsen und drei weitere Bundesländer ihre Absicht kund, ab 2018 insgesamt 50 bis 60 der Züge in Betrieb zu nehmen.<sup>11</sup> Bei erfolgreicher Erprobung stehen die Chancen für eine breitere Markteinführung mithin gut.

## Frage 6: Welche Einsatzfelder für Brennstoffzellen gibt es im stationären Bereich?

Wenngleich stationäre Anwendungen von Brennstoffzellen weniger Beachtung finden als der Einsatz im Mobilitätsbereich, sind sie doch sehr wichtig: Bis 2016 übertraf die kumulierte Leistung der weltweit gelieferten Brennstoffzellen für stationäre Nutzung die der Brennstoffzellen für mobile Zwecke deutlich; hinsichtlich der gelieferten Stückzahlen ist dies noch heute der Fall. Erst mit der wachsenden Anzahl kommerziell vertriebener FCEVs entwickelt sich der Mobilitätsbereich zum wichtigsten Markt. Unter stationären Brennstoffzellenanwendungen wird zumeist eine energetische Nutzung verstanden, die Strom und Wärme für verschiedene Einsatzzwecke liefert. Einsatzfelder beinhalten den Hausenergiebereich, die Notstrom- und unterbrechungsfreie Stromversorgung, die Energiebereitstellung für Industrie und Gewerbe sowie die netzferne Stromversorgung.<sup>12</sup> Überdies können Brennstoffzellen und Wasserstoff bei weiteren stationären Anwendungen, wie der Speicherung großer Energiemengen oder der stofflichen Nutzung in der Industrie, zum Einsatz kommen (Fragen 7 und 32 bis 35). Nachfolgend wird aber nur der Hausenergiebereich als das wichtigste Einsatzfeld diskutiert.

Im Hausenergiebereich werden sowohl PEMFCs auch SOFCs mit KWK eingesetzt und produzieren neben Strom auch Wärme. Die Anlagen können wahlweise strom- oder wärmegeführt gefahren werden und orientieren sich dabei an der jeweils benötigten Energieform. Zumeist wird eine stromgeführte Fahrweise gewählt, um von der höheren Wertigkeit des Stroms zu profitieren; die als Nebenprodukt entstehende Wärme wird zur Gebäudebeheizung genutzt. Aufgrund der benötigten geringen Leistungen werden die Geräte auch Mikro- oder Mini-KWK-Anlagen genannt. Der größte Vorteil der Anlagen liegt in ihrer sehr hohen Energieeffizienz: Durch die kombinierte Produktion von Strom und Wärme werden Gesamtwirkungsgrade von bis zu 95 Prozent erreicht. Betrieben werden die Geräte mit Erd- oder Biogas, das – je nach eingesetzter Technologie – entweder vor oder nach dem Eingang in die Brennstoffzelle in Wasserstoff gewandelt wird. Da in Ländern wie Deutschland etwa jedes zweite Gebäude über einen Erdgasanschluss verfügt, entfällt eine logistisch aufwendige Versorgung mit reinem Wasserstoff.<sup>13</sup>

Allerdings sind die Herstellungskosten der Anlagen noch zu hoch, um ohne öffentliche Förderung einen erfolgreichen Markteintritt zu ermöglichen. Daher wurden verschiedene Förderprogramme initiiert, die die frühe Kommerzialisierung der technologisch reifen Anlagen aus umwelt- und industriepolitischen Gründen erfolgreich unterstützen: So wurden in Japan mithilfe des staatlichen Ene-Farm-Programms bereits um die 200.000 Systeme installiert; die Zahl soll bis 2020 auf mehr als 1 Million und bis 2030 auf über 5 Millionen steigen.<sup>14</sup> In der EU unterstützte das Mitte 2017 ausgelaufene Projekt „ene.field“ den Aufbau von über 1.000 Systemen in Mitgliedsstaaten der Union; das angelaufene Nachfolgeprojekt PACE hat den Zubau mindestens 2.500 weiterer Anlagen bis 2021 zum Ziel.<sup>15</sup> In Deutschland wurden im Rahmen des Projekts CALLUX der Bundesregierung bis 2014 ungefähr 500 Systeme installiert; seit 2016 bietet ein mit einem umfangreichen Budget ausgestattetes Technologieeinführungsprogramm attraktive Anreize für den weiteren Anlagenzubau.

<sup>14</sup> [www.fuelcellindustryreview.com/archive/TheFuelCellIndustryReview2016.pdf](http://www.fuelcellindustryreview.com/archive/TheFuelCellIndustryReview2016.pdf)

<sup>15</sup> [www.pace-energy.eu/press-release-pace-project-will-move-fuel-cell-micro-cogeneration-mass-market-commercialisation](http://www.pace-energy.eu/press-release-pace-project-will-move-fuel-cell-micro-cogeneration-mass-market-commercialisation)

## Frage 7: Lassen sich verschiedene Wirtschaftssektoren durch Wasserstoff und Brennstoffzellen koppeln?

Aufgrund seiner Eignung sowohl für den mobilen wie auch stationären Einsatz bietet sich Wasserstoff als Medium zur Kopplung verschiedener Wirtschaftssektoren an. Im Kontext der Energiewende und des darin vorgesehenen umfassenden Ausbaus von EE ist dies von besonderer Bedeutung. Stark wachsende Anteile fluktuierender Wind- und Solarstroms müssen verstetigt und in die Verkehrs- und Energiewirtschaft in Form von Strom und Wärme eingebunden werden. Im deutlichen Gegensatz zur bisherigen Energieversorgung sind die Versorgungspfade nicht mehr klar voneinander getrennt und durch die Dominanz von Kohle, Kernenergie und Erdgas im stationären Bereich bzw. von Erdöl im Verkehrsbereich gekennzeichnet. Stattdessen kann und muss aus EE erzeugter Strom bzw. Wärme in beide Bereiche eingebracht und dort genutzt werden. Dies gilt auch für verschiedene Zweige der Industrie, die Wasserstoff energetisch und als Produktionsmittel nutzen. Damit werden EE und der daraus hergestellte Wasserstoff (EE-Wasserstoff) zum Bindeglied zwischen den Sektoren.

<sup>16</sup> Ehret, O. und Bonhoff, K.: Hydrogen as a fuel and energy storage: Success factors for the German Energiewende, in: International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 40, 2015, Nr. 15, S. 5526–5533

EE-Wasserstoff für jegliche Anwendung wird hauptsächlich per Wasserelektrolyse aus Wind- oder Solarstrom hergestellt und anschließend gespeichert (Frage 17). Unregelmäßig und nicht nachfragegerecht auftretende EE können somit verstetigt und für den nachfragegerechten Abruf bereitgestellt werden. Wasserstoff wird z.B. – je nach Standort der Produktionsanlage – vor Ort oder nach Transport dem Verkehr als Kraftstoff zugeführt (Frage 18).<sup>16</sup> Akteure der Erdgaswirtschaft entwickeln Power-to-Gas-Anlagen und speisen EE-Wasserstoff in Erdgasnetze ein.<sup>17</sup> Auch der Ersatz

<sup>17</sup> Wesentliche Akteure haben sich in der Strategieplattform Power to Gas der Deutschen Energie-Agentur und in der DWV-Fachkommission „performing energy“ zusammengeschlossen. Deren Websites [www.dena.de/themen-projekte/projekte/energiesysteme/strategieplattform-power-to-gas](http://www.dena.de/themen-projekte/projekte/energiesysteme/strategieplattform-power-to-gas) und [www.dwv-info.de/performing-energy](http://www.dwv-info.de/performing-energy) bieten weiterführende Informationen

fossil produzierten Industrierwasserstoffs durch Wasserstoff aus EE wird heute diskutiert. Der Begriff der Sektorenkopplung hat sich seit einiger Zeit bei relevanten Akteuren etabliert und motiviert die Ausarbeitung entsprechender Geschäftsmodelle ebenso wie die Durchführung von Demonstrationsprojekten. Durch Sektorenkopplung soll ein Beitrag sowohl zum Gelingen der Energiewende wie auch zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit der Wasserstoffnutzung geleistet werden.



## 2. Brennstoffzellen im Straßenverkehr

Im zweiten Themenkomplex wird der Einsatz von FCEVs im Straßenverkehr behandelt. Dies umfasst technologischen Aufbau, Eignung für bestimmte Fahrzeugklassen, Umweltverhalten und Zuordnung zur Elektromobilität. Zentral sind die Kommerzialisierungsaktivitäten verschiedener Hersteller von Brennstoffzellen-Pkw in Deutschland. Aber auch Brennstoffzellenbusse und -Lkw werden diskutiert.



## Frage 8: Wie sind Brennstoffzellenfahrzeuge aufgebaut und in welchen Fahrzeugklassen werden Brennstoffzellen eingesetzt?

Brennstoffzellen können prinzipiell in den meisten Kraftfahrzeugarten eingesetzt werden und dort z. B. Verbrennungsmotoren ersetzen. Für den Antrieb von FCEVs kommen ausschließlich PEM-Brennstoffzellen zum Einsatz; sie erzeugen durch die kontrollierte Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff elektrischen Strom, wobei lediglich Wasserdampf als „Abgas“ entsteht.<sup>18</sup> Der Wasserstoff wird in aller Regel gasförmig und bei Drücken von bis zu 700 bar in Druckbehältern mitgeführt, während der Sauerstoff der Umgebungsluft entnommen wird. Der hergestellte Strom treibt einen Elektromotor an oder wird in bestimmten Fahrsituationen in einer Pufferbatterie gespeist, die in anderen Situationen Strom an den Motor abgibt. Leistungselektronik und Komponenten zur Rückgewinnung von Bremsenergie gehören ebenfalls zu den Standardkomponenten eines FCEV-Antriebsstrangs.<sup>19</sup> Prinzipiell ist diese Konfiguration bei Pkw, Bussen und anderen Nutzfahrzeugen dieselbe, obwohl naturgemäß deutliche Unterschiede in der spezifischen Auslegung von Systemen und Komponenten bestehen.<sup>20</sup>

Die nachfolgende Abbildung illustriert den Aufbau eines FCEV am Beispiel eines Mercedes-Benz GLC F-CELL, der allerdings im Gegensatz zu den meisten anderen FCEVs als Plug-in-Hybrid konzipiert ist und daher über eine Lithium-Ionen-Batterie außergewöhnlich großer Kapazität verfügt.<sup>21</sup>

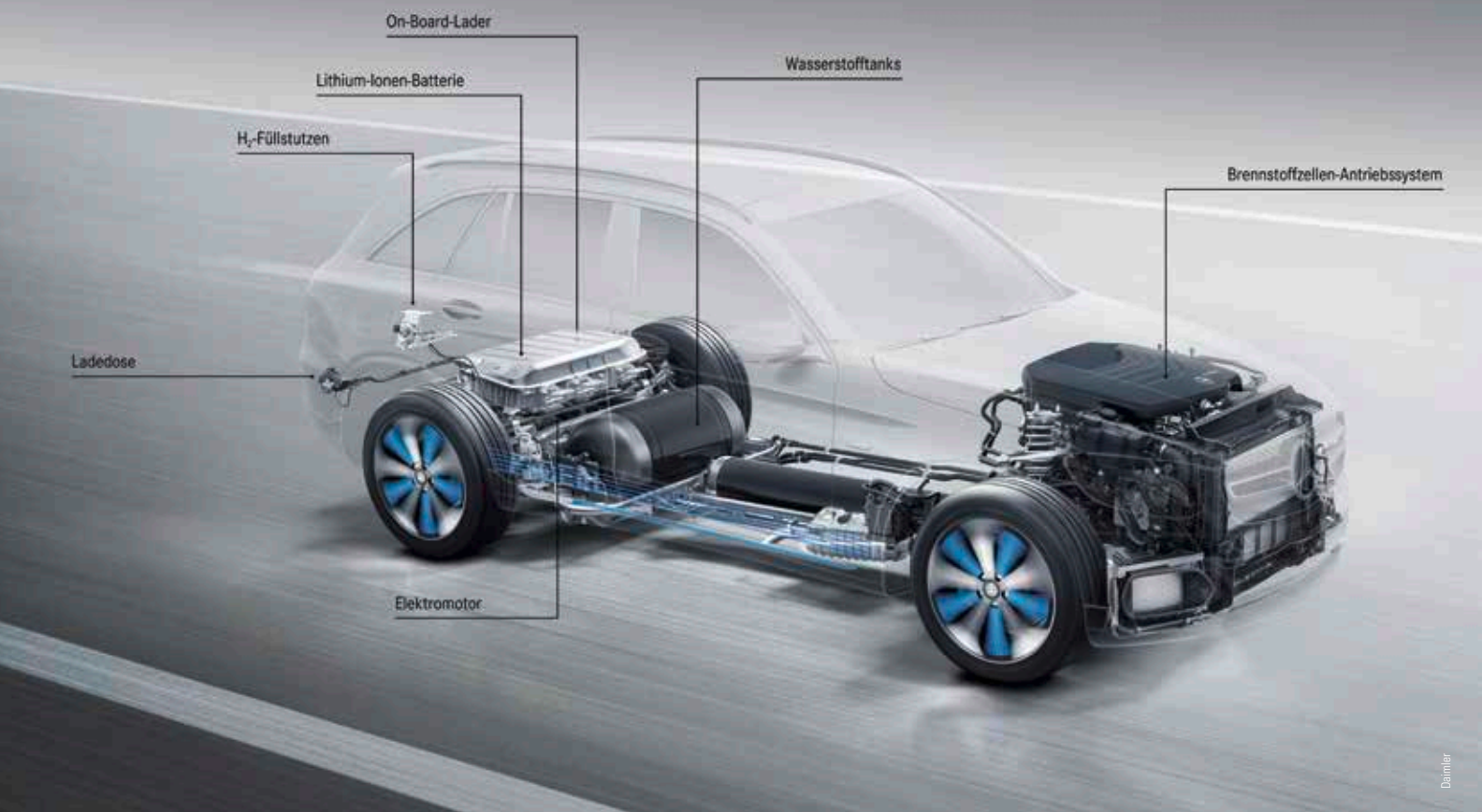
Die meisten FCEVs werden heute weltweit als Pkw und – in deutlich geringerer Anzahl – als Stadtbusse angeboten (Frage 3). Dies entspricht einerseits der Tatsache, dass Pkw generell das größte Segment des globalen Fahrzeugmarktes darstellen und zugleich die Absatzzahlen der meisten auch FCEVs herstellenden Automobilunternehmen dominieren. Andererseits wird heute international aufgrund massiver innerstädtischer Umweltprobleme der Ruf nach Null-Emissions-Stadtbussen immer lauter. Brennstoffzellen sind generell im Teillastbereich besonders effizient und damit für den Stadtverkehr gut geeignet; im Gegensatz zu Pkw profitieren Busse als Flottenfahrzeuge auch von vergleichsweise geringen Anforderungen an die Betankungsinfrastruktur. In Pkw und Bussen werden weitgehend die gleichen Komponenten verbaut, was wichtige Lernerfahrungen bezüglich technischer Optimierung und Kostensenkung unter Nutzung von Synergieeffekten ermöglicht. Zugleich wird die Basis für die Entwicklung und den Einsatz leistungstärkerer Brennstoffzellen und Antriebsstränge der nächsten Generation gelegt, die dann in schweren Nutzfahrzeugen zum Einsatz kommen können.

<sup>18</sup> In wenigen Fällen wurde für die Bordstromversorgung von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor auch ein anderer Brennstoffzellentyp versuchsweise eingesetzt.

<sup>19</sup> Die Website der Clean Energy Partnership (CEP) bietet eine gute Übersicht zu Technik und aktuellen Entwicklungen im Bereich brennstoffzellenbetriebener Pkw und Busse sowie Wasserstoffinfrastruktur ([cleanenergypartnership.de](http://cleanenergypartnership.de)). Die CEP ist ein Zusammenschluss privatwirtschaftlicher Akteure und bündelt vielfältige von der Bundesregierung geförderte Demonstrationsprojekte.

<sup>20</sup> Weiterführende Informationen zur Fahrzeugtechnik finden sich auf den Websites der Hersteller von FCEVs.

<sup>21</sup> Bildquelle: [media.daimler.com/mars/MediaSite/de/instance/picture.xhtml?oid=29181799&ls=L2RIL2Iuc3RhbmNIL2tvLnhodG1sP3JlbElkPTEwMDEmcmVzdWx0SW5mb1R5cGVJZD0xNzImb2IkPTI5MTgxNDU3JmZyb21PaWQ9MjkxODE0NTcmYm9yZGVycz10cnVI&rs=32](http://media.daimler.com/mars/MediaSite/de/instance/picture.xhtml?oid=29181799&ls=L2RIL2Iuc3RhbmNIL2tvLnhodG1sP3JlbElkPTEwMDEmcmVzdWx0SW5mb1R5cGVJZD0xNzImb2IkPTI5MTgxNDU3JmZyb21PaWQ9MjkxODE0NTcmYm9yZGVycz10cnVI&rs=32)



## Frage 9: Wo liegen die Vorteile von Brennstoffzellenantrieben im Allgemeinen und für bestimmte Fahrzeugklassen?

Der Grundgedanke hinter dem Design von FCEVs besteht darin, Nutzern einen vollwertigen Ersatz für konventionelle Fahrzeuge zu bieten, ohne Änderungen im Nutzungsverhalten zu verlangen. Daher kommen Fahrdynamik, Reichweite und Betankungszeiten den „Vorgaben“ konventioneller Verbrenner nahe. Erhebliche Unterschiede bestehen aber hinsichtlich der Nachhaltigkeit der Antriebskonzepte: Ähnlich wie Batteriefahrzeuge (Battery Electric Vehicles: BEVs) ermöglichen FCEVs die Nutzung erneuerbarer statt fossiler Energien als Kraftstoff. Durch die Nutzung eines hocheffizienten Antriebsstrangs weisen FCEVs etwa die doppelte Energieeffizienz eines Verbrenners auf. Beim Fahrbetrieb entstehen keine Treibhausgas- oder Schadstoffemissionen und nahezu kein Antriebsgeräusch.<sup>22</sup> Ein wesentlicher Vorteil von FCEVs sind die gegenüber BEVs deutlich kürzeren Betankungszeiten. Wie alle Elektrofahrzeuge sind FCEVs insbesondere für den Einsatz in Städten attraktiv, da sie wesentlich zur Reduzierung lokaler Umweltbelastungen beitragen können.

Sowohl FCEVs wie auch BEVs bieten deutliche Vorteile, wenn es darum geht, den Straßenverkehr nachhaltiger zu machen. Im direkten Vergleich weisen FCEVs und BEVs jeweils spezifische Stärken und Schwächen auf: Während BEVs auf kürzeren Strecken Vorteile einer noch effizienteren Energiewandlung ausspielen können, bieten FCEVs eine größere Reichweite. Trotz raschen technologischen Fortschritts

<sup>22</sup> Ehret, O. und Dignum, M.: Introducing hydrogen and fuel cell vehicles in Germany, in: Geels, F., Kemp, R., Dudley, G. und Lyons, G. (Hrsg.): *Automobility in Transition? A Socio-Technical Analysis of Sustainable Transport*, New York (USA) und Abingdon (UK) 2012: Routledge, S. 229–24.

<sup>23</sup> [www.elektroauto-news.de/wiki/elektroauto-vergleich](http://www.elektroauto-news.de/wiki/elektroauto-vergleich) und [www.focus.de/auto/elektroauto/](http://www.focus.de/auto/elektroauto/). Zudem verringern sich die nominellen Reichweiten von BEVs im Winter technologiebedingt.

<sup>24</sup> Vergleiche [www.streetscooter.eu](http://www.streetscooter.eu)

<sup>25</sup> [www.e-mobilbw.de/files/e-mobil/content/DE/Publikationen/epaper/studienutzfahrzeuge/index.html](http://www.e-mobilbw.de/files/e-mobil/content/DE/Publikationen/epaper/studienutzfahrzeuge/index.html)

<sup>26</sup> [www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/MKS/initiative-klimafreundlicher-strassengueterverkehr.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/MKS/initiative-klimafreundlicher-strassengueterverkehr.pdf?__blob=publicationFile)

<sup>27</sup> Von unterschiedlichen Quellen werden oftmals voneinander abweichende Angaben zum Bestand und geplanten Absatz von FCEVs aller weltweiten Hersteller gemacht. Die im vorliegenden Bericht genannten Zahlen beruhen im Kern auf Herstellerangaben und wurden validiert.

<sup>28</sup> [www.hyundai.de/Modelle/ix35-Fuel-Cell.html](http://www.hyundai.de/Modelle/ix35-Fuel-Cell.html)

<sup>29</sup> [www.hyundai.de/News/Modelle/Hyundai-ix35-Fuel-Cell-bei-allen-deutschen-Vertrag.html](http://www.hyundai.de/News/Modelle/Hyundai-ix35-Fuel-Cell-bei-allen-deutschen-Vertrag.html) und [www.hyundai.de/News/Unternehmen/Ubergabe-von-50-Hyundai-ix35-Fuel-Cell-an-den-Cars.html](http://www.hyundai.de/News/Unternehmen/Ubergabe-von-50-Hyundai-ix35-Fuel-Cell-an-den-Cars.html)

<sup>30</sup> Persönliche Mitteilung Oliver Gutt, Hyundai Motor Deutschland GmbH, 08.09.2017

<sup>31</sup> [beezero.com/de](http://beezero.com/de)

<sup>32</sup> [www.electrive.net/2017/06/20/hyundai-nennt-produktionszahlen-des-fe-fuel-cell-concept](http://www.electrive.net/2017/06/20/hyundai-nennt-produktionszahlen-des-fe-fuel-cell-concept)

liegen die Reichweiten der meisten bis heute angebotenen BEVs im Alltagsbetrieb bei unter 200 km.<sup>23</sup> Auch erfolgreich vertriebene batteriebasierte Lieferfahrzeuge bieten bislang nur geringe Reichweiten.<sup>24</sup> Demgegenüber beträgt die reale Reichweite heute am Markt angebotener und relativ großer Brennstoffzellen-Pkw etwa 500 km. Die Reichweite von Brennstoffzellenbussen liegt bei etwa 300 km und ist technisch unschwer ausbaufähig (Fragen 12 und 13). Je nach Anforderungsprofil der jeweiligen Anwendung kann die höhere Reichweite von FCEVs einen wesentlichen Vorteil darstellen.

Auch das Fahrzeuggewicht ist für den Vergleich von FCEVs und BEVs relevant. Bei den am Markt verfügbaren BEVs handelt es sich überwiegend um kleinere Pkw oder leichte Nutzfahrzeuge. Demgegenüber sind FCEVs zumeist schwerere Fahrzeuge. Während höhere Fahrzeugmassen bei BEVs nur unter Inkaufnahme höherer Batteriegewichte und damit einer verringerten Nutzlast realisierbar sind, tritt eine vergleichbare Problematik bei FCEVs nicht auf.<sup>25</sup> Batteriebasierte schwere Fahrzeuge erscheinen bislang nur bei geringeren Reichweitenanforderungen sinnvoll, während schwere brennstoffzellenbasierte Fahrzeuge durchaus auch höhere Reichweiten realisieren können. Ein vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur erstellter Fahrplan für einen klimafreundlichen Straßengüterverkehr betrachtet Wasserstoff und Brennstoffzellen als eine zukünftig zentrale Antriebsoption. Begründet wird dies mit der besonderen Eignung von FCEVs für hohe Reichweiten und Fahrzeugmassen.<sup>26</sup> Da für schwere Pkw und Nutzfahrzeuge in Deutschland heute fast ausschließlich Dieselmotoren zum Einsatz kommen, handelt es sich bei Brennstoffzellen um einen potenziellen Dieseleratz.

## Frage 10: Welche Brennstoffzellenfahrzeuge werden bereits heute und in naher Zukunft am Markt angeboten?

FCEVs werden seit mehreren Jahren von asiatischen Automobilunternehmen zum Kauf oder Leasing angeboten.<sup>27</sup> Der südkoreanische Hersteller Hyundai brachte Ende 2013 sein Brennstoffzellen-SUV ix35 Fuel Cell mit einer Motorleistung von 100 kW und einer nominalen Reichweite von knapp 600 km auf den Markt.<sup>28</sup> Die Fahrzeuge waren zunächst für den heimischen Markt und später für Kalifornien sowie Europa bestimmt.<sup>29</sup> Bis Mitte 2017 setzte Hyundai 500 der Sports Utility Vehicles (SUVs) in Europa zum Listenpreis von 65.450 € ab und lieferte davon über 120 in Deutschland aus.<sup>30</sup> Das Unternehmen Linde betreibt seit 2016 in der eigens gegründeten Carsharing-Tochterfirma BeeZero eine Flotte von 50 der Fuel Cell SUVs in München.<sup>31</sup> Weltweit wurden bislang maximal 1.000 der SUVs verkauft. Hyundai hat den Verkaufsbeginn eines technisch deutlich verbesserten Nachfolgemodells für das Frühjahr 2018 angekündigt und will davon zunächst 3.600 Exemplare produzieren.<sup>32</sup> Der der

Öffentlichkeit bereits vorgestellte Next-Gen Fuel Cell SUV verfügt über eine Motorleistung von 120 kW und eine nominale Reichweite von 800 km. In Deutschland soll das Fahrzeug, so die vorläufigen Informationen, zum gegenüber dem Vorgänger erheblich gesenkten Preis von 54.000 € verkauft werden.

Seit Ende 2014 vertreibt der japanische Automobilkonzern Toyota die Brennstoffzellenlimousine Mirai mit einer Motorleistung von 113 kW und einer angegebenen Reichweite von 500 km für etwa 79.000 €. <sup>33</sup> Die meisten der FCEVs wurden in Japan und Kalifornien sowie – in deutlich geringeren Stückzahlen – in Europa verkauft bzw. verleast. Toyota setzte bis Anfang 2017 weltweit knapp 3.000 Fahrzeuge ab. In Deutschland wurden im Jahr 2016 nur 27 Mirai verkauft. <sup>34</sup> Im Rahmen einer im September 2017 bekannt gegebenen Fördermaßnahme der Bundesregierung werden zusätzliche 185 Mirai in Dienst gestellt. <sup>35</sup> Toyota erprobt seit Anfang 2017 auch den Vorserien-Brennstoffzellenbus FC Bus in Japan und strebt kurzfristig einen Einsatz von 100 Exemplaren an. Der FC Bus integriert die zentralen Komponenten des Mirai in das weit größere Fahrzeug und verwendet z. B. statt einer nun zwei Brennstoffzellen. <sup>36</sup> Die Markteinführung der nächsten Pkw-Generation ist für 2020 mit einem jährlichen Produktionsvolumen von 30.000 Exemplaren geplant. Für 2025 hat Toyota den Beginn eines deutlich verstärkten Engagements angekündigt. <sup>37</sup>

Der japanische Automobilhersteller Honda hat im Frühjahr 2016 die Serienproduktion seiner Brennstoffzellenlimousine Clarity Fuel Cell aufgenommen. Die Motorleistung beträgt 130 kW und die angegebene Reichweite etwa 650 km. <sup>38</sup> Von April bis Dezember 2016 wurden zunächst 150 rechtsgelenkte Fahrzeuge in den japanischen Markt gebracht. <sup>39</sup> Die Produktion für Kalifornien begann Ende 2016 und bis Mai 2017 wurden in Kalifornien über 250 Exemplare zum Stückpreis von 57.000 US\$, inklusive eines Wasserstofftankguthabens im Wert von 15.000 US\$, über drei Jahre verleast. Ende 2016 wurden die ersten von insgesamt zehn für Europa bestimmten FCEVs ausgeliefert; sie kommen in europäischen Demonstrationsprojekten zum Einsatz. Kommerziell wird das Fahrzeug in Japan und Kalifornien angeboten. Ein Nachfolger wurde für die frühen 2020er angekündigt und soll deutlich preisgünstiger und in größeren Stückzahlen vertrieben werden. <sup>40</sup>

Daimler entwickelt und erprobt seit etwa zwei Jahrzehnten Brennstoffzellen-Pkw und -Busse und hat schon vor längerer Zeit angekündigt, 2017 einen neuen Brennstoffzellen-Kompaktwagen auf Basis des GLC vorzustellen. Frühzeitig wurde bekannt, dass das Fahrzeug im Gegensatz zu anderen FCEVs über eine relativ große Lithium-Ionen-Batterie samt Plug-in-Modul verfügen und eine rein batterieelektrische Fahrt von 50 km ermöglichen soll. <sup>41</sup> Der als Vorserienmodell bezeichnete Mercedes-Benz GLC F-CELL kam im Juli 2017 anlässlich der Eröffnung einer Wasserstofftankstelle erstmals prominent zum Einsatz und wurde auf der Internationalen Automobil-Ausstellung im September offiziell vorgestellt (siehe Abbildung Frage

<sup>33</sup> [www.toyota.de/automobile/der-toyota-mirai.json](http://www.toyota.de/automobile/der-toyota-mirai.json)

<sup>34</sup> Geitmann, S.: Toyota setzt auf die Brennstoffzelle: Probefahrt mit dem Mirai, in: HZwei: Das Magazin für Wasserstoff und Brennstoffzellen, 17. Jahrgang, 2017, Heft 2, S. 28–29, Lehner, S. und Hart, D.: BZ-Markt: Transportbereich wächst rasant (Fußnote 5)

<sup>35</sup> [www.now-gmbh.de/de/aktuelles/presse/nip-3-2-millionen-euro-fuer-brennstoffzellen-pkw](http://www.now-gmbh.de/de/aktuelles/presse/nip-3-2-millionen-euro-fuer-brennstoffzellen-pkw)

<sup>36</sup> [www.toyota.de/news/details-2017-023.json](http://www.toyota.de/news/details-2017-023.json)

<sup>37</sup> [www.toyota.de/news/details-2017-023.json](http://www.toyota.de/news/details-2017-023.json)

<sup>38</sup> [automobiles.honda.com/clarity](http://automobiles.honda.com/clarity) und [www.honda.de/cars/honda-welt/news-events/2016-11-30-honda-clarity-fuel-cell-kommt-nach-europa.html](http://www.honda.de/cars/honda-welt/news-events/2016-11-30-honda-clarity-fuel-cell-kommt-nach-europa.html) und [hondanews.eu/at/de/cars/media/pressreleases/107266/honda-clarity-fuel-cell-2017-pressemappe](http://hondanews.eu/at/de/cars/media/pressreleases/107266/honda-clarity-fuel-cell-2017-pressemappe)

<sup>39</sup> [world.honda.com/news/2015/4151028eng.html](http://world.honda.com/news/2015/4151028eng.html) und [world.honda.com/news/2016/4160310eng.html](http://world.honda.com/news/2016/4160310eng.html)

<sup>40</sup> Persönliche Mitteilung Thomas Brachmann, Honda R&D Europe (Deutschland) GmbH, 05.09.2017

<sup>41</sup> [www.now-gmbh.de/content/1-aktuelles/1-presse/20161214-nip-erfolgreiche-bilanz/9b\\_prof-mohrdeck-final-sent.pdf](http://www.now-gmbh.de/content/1-aktuelles/1-presse/20161214-nip-erfolgreiche-bilanz/9b_prof-mohrdeck-final-sent.pdf)

<sup>42</sup> [cleanenergypartnership.de/presse/pressemitteilungen-und-media.daimler.com/mars-MediaSite/de/instance/ko/Mercedes-Benz-Cars-auf-der-IAA-2017-Aufsehen-erregende-Fahrzeug-Neuheiten-und-innovative-Veranstaltungsformate-vom-Erfinder-des-Automobils.xhtml?oid=28924491](http://cleanenergypartnership.de/presse/pressemitteilungen-und-media.daimler.com/mars-MediaSite/de/instance/ko/Mercedes-Benz-Cars-auf-der-IAA-2017-Aufsehen-erregende-Fahrzeug-Neuheiten-und-innovative-Veranstaltungsformate-vom-Erfinder-des-Automobils.xhtml?oid=28924491)

<sup>43</sup> [www.daimler.com/innovation/specials/iaa-2017/glc-fcell.html](http://www.daimler.com/innovation/specials/iaa-2017/glc-fcell.html)

<sup>44</sup> [www.automobil-produktion.de/hersteller/neue-modelle/die-naechste-wasserstoff-welle-2017-tidenhub-281.html](http://www.automobil-produktion.de/hersteller/neue-modelle/die-naechste-wasserstoff-welle-2017-tidenhub-281.html). Konzernchef Zetsche hatte im März 2017 die Vorteile des Brennstoffzellenantriebs gegenüber dem Batterieantrieb für die kommenden Jahre relativiert, dessen grundsätzliche Potenziale aber nicht infrage gestellt.

<sup>45</sup> [cleanenergypartnership.de](http://cleanenergypartnership.de)

<sup>46</sup> Lehner, S. und Hart, D.: BZ-Markt: Transportbereich wächst rasant (Fußnote 5)

<sup>47</sup> [www.now-gmbh.de](http://www.now-gmbh.de) und [www.fch.europa.eu](http://www.fch.europa.eu)

8).<sup>42</sup> Die Leistung des Motors beträgt 147 kW und die nominelle Reichweite 500 km. Eigenen Angaben zufolge bereitet sich Daimler „konsequent auf die Serienfertigung des Mercedes-Benz GLC F-CELL vor“<sup>43</sup> und strebt an, 2018 mit der Produktion von bis zu 1.000 FCEVs zu beginnen.<sup>44</sup> Aussagen zum genauen Verkaufsstart und zum Preis wurden jedoch nicht gemacht.

## Frage 11: Gibt es einen generellen Trend zur Kommerzialisierung von Brennstoffzellenfahrzeugen?

International trägt die Erprobung von Demonstrationsfahrzeugen verschiedener Arten und Generationen wesentlich zur technologischen Weiterentwicklung und letztlich zur Marktreife von FCEVs bei. In Demonstrationsprojekten erproben Unternehmen Fahrzeuge nebst Wasserstoff-Betankungsanlagen zumeist unter Inanspruchnahme staatlicher Förderung. In Deutschland ist die Clean Energy Partnership (CEP) das zentrale Leuchtturmprojekt und bündelt eine Vielzahl von Einzelprojekten. Im Rahmen der CEP wurden von 2002 bis Ende 2016 brennstoffzellenbetriebene Pkw und Busse mit Unterstützung der Bundesregierung erprobt. Einschließlich der vier unter Frage 10 vorgestellten Automobilunternehmen waren in der CEP 20 Industriepartner aktiv. In wechselnden Kontingenten wurden FCEVs von Audi, BMW, Daimler, Honda, Hyundai, Toyota, Volkswagen und weiteren Herstellern betrieben.<sup>45</sup> Auch international gibt es vergleichbare Projekte, wie z. B. die California Fuel Cell Partnership (Frage 27). In Deutschland wie weltweit nimmt die Relevanz von Demonstrationsprojekten jedoch zugunsten eines kommerziellen Fahrzeugvertriebs ab.

Die meisten der weltweit hergestellten FCEVs werden bislang in Japan und Kalifornien sowie – in wesentlich kleineren Stückzahlen – in Europa abgesetzt.<sup>46</sup> Auch Südkorea und China etablieren sich als wichtige Märkte. Vor allem in Asien und Kalifornien wird ein erheblicher Zuwachs an Fahrzeugen und Tankstellen erwartet. Der Absatz von FCEVs hängt wesentlich von politischen Fördermaßnahmen und der Verfügbarkeit von Wasserstofftankstellen ab. In den hinsichtlich Flottengrößen führenden Ländern werden Fahrzeugkäufe und Infrastruktur staatlich hoch bezuschusst (Fragen 27 bis 30). In Europa und Deutschland wurden bislang v. a. einschlägige F&E- sowie Demonstrationsmaßnahmen gefördert, während Maßnahmen der Marktaktivierung erst in letzter Zeit Bedeutung erlangten.<sup>47</sup> Die politische Unterstützung für Wasserstoff und Brennstoffzellen ist insgesamt geringer.

In Deutschland sind derzeit etwa 250 vorkommerzielle und kommerzielle FCEVs in Betrieb, von denen ein Großteil auf die CEP und den Carsharing-Service BeeZero entfällt. Dabei wächst die Zahl der im Einsatz befindlichen FCEVs rasch. Wesentlich ist dafür eine Anfang 2017 von der Bundesregierung verabschiedete Förderrichtlinie, die bei im Flottenbetrieb eingesetzten FCEVs aller Bauarten eine Übernahme von



bis zu 40 Prozent der Investitionsmehrkosten, die gegenüber vergleichbaren konventionellen Fahrzeugen entstehen, vorsieht.<sup>48</sup> Nach Anrechnung des Zuschusses wäre ein Hyundai ix35 Fuel Cell für etwa 48.000 € und ein Toyota Mirai für etwa 57.000 € zu erwerben.<sup>49</sup> Kommt der Hyundai Next-Gen Fuel Cell zum angekündigten Preis von 54.000 €, wäre nach Abzug des Zuschusses ein Endkundenpreis von etwa 40.000 € zu erwarten. Sicherlich würde dies den Trend zur breiteren Kommerzialisierung verstärken.

## Frage 12: Wie ist es um die Marktreife von Brennstoffzellenbussen und -Lastkraftwagen bestellt?

Brennstoffzellenbusse verschiedener Hersteller werden in mehreren groß angelegten internationalen Demonstrationsprojekten getestet und kontinuierlich weiterentwickelt. Beispielsweise wurden im Rahmen des von der Europäischen Union geförderten und Ende 2016 abgeschlossenen Projekts „Clean Hydrogen In European Cities“ (CHIC) 54 Busse der Firmen APTS, EvoBus, New Flyer, Van Hool und Wrightbus primär in europäischen Städten erprobt.<sup>50</sup> Das Anfang 2017 angelaufene Nachfolgeprojekt „Joint Initiative for Hydrogen Vehicles across Europe“ (JIVE) unterstützt die Beschaffung von etwa 140 Bussen in Europa. Mit der Bestellung einer größeren Anzahl von Fahrzeugen durch Einkaufsgemeinschaften können die Kosten deutlich gesenkt und die Kommerzialisierung der Busse vorangebracht werden. Die Busse erreichen durchschnittliche Reichweiten von etwa 300 km und bieten eine Dieselbussen vergleichbare betriebliche Flexibilität.

Neben den derzeit kommerziell vertriebenen Brennstoffzellenbussen von Solaris, Ursus Bus und Van Hool werden Fahrzeuge u. a. von EvoBus, Hyundai, Toyota und Wrightbus am europäischen Markt voraussichtlich zeitnah verfügbar sein. Diese könnten z. B. im Zuge eines geplanten Anschlussprojekts der EU zur Beschaffung weiterer 150 Busse zum Einsatz kommen. Bei der Beschaffung von Brennstoffzellenbussen ergänzen sich die Förderangebote von EU und Mitgliedsstaaten wie Deutschland und mindern die gegenüber konventionellen Bussen entstehenden Mehrkosten erheblich. Gleichzeitig entscheiden sich zahlreiche europäische Städte dazu, Dieselbusse durch Brennstoffzellenbusse und andere lokal emissionsfreie Fahrzeuge zu ersetzen. Daher wird bereits 2020 mit einem Bestand von 140 Brennstoffzellenbussen in Deutschland und von über 600 in ganz Europa gerechnet.<sup>51</sup> Jüngstes Beispiel für die beginnende Kommerzialisierung ist die Bestellung von 30 Bussen durch die Regionalverkehr Köln GmbH.<sup>52</sup>

<sup>48</sup> [www.now-gmbh.de/content/2-nationales-innovationsprogramm/2-foerderprogramm/bundesanzeiger\\_nip2-frl-ma.pdf](http://www.now-gmbh.de/content/2-nationales-innovationsprogramm/2-foerderprogramm/bundesanzeiger_nip2-frl-ma.pdf)

<sup>49</sup> [www.hzwei.info/blog/2017/08/09/40-foerderung-fuer-bz-autos-allerdings-fehlen-die-fahrzeuge/#comments](http://www.hzwei.info/blog/2017/08/09/40-foerderung-fuer-bz-autos-allerdings-fehlen-die-fahrzeuge/#comments)

<sup>50</sup> Stolzenburg, K.: Brennstoffzellenbusse auf der Überholspur: CHIC-Projektabschluss in London, in: HZwei: Das Magazin für Wasserstoff und Brennstoffzellen, 17. Jahrgang, 2017, Heft 1, S. 20–21

<sup>51</sup> Persönliche Mitteilung Thorsten Herbert, NOW GmbH, 18.09.2017

<sup>52</sup> [www.now-gmbh.de/de/aktuelles/presse/koeln-beschafft-groesste-brennstoffzellen-hybridbus-flotte-deutschlands](http://www.now-gmbh.de/de/aktuelles/presse/koeln-beschafft-groesste-brennstoffzellen-hybridbus-flotte-deutschlands)

<sup>53</sup> [www.toyota.de/news/details-2017-032.json](http://www.toyota.de/news/details-2017-032.json) und [nikolamotor.com](http://nikolamotor.com)

<sup>54</sup> [www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/MKS/initiative-klimafreundlicher-strassengueterverkehr.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/MKS/initiative-klimafreundlicher-strassengueterverkehr.pdf?__blob=publicationFile)

<sup>55</sup> Toyota: Mirai: The world's first mass-produced hydrogen fuel cell vehicle, o. O., o. J.

<sup>56</sup> [www.automobil-produktion.de/hersteller/neue-modelle/die-naechste-wasserstoffwelle-2017-tidenhub-281.html](http://www.automobil-produktion.de/hersteller/neue-modelle/die-naechste-wasserstoffwelle-2017-tidenhub-281.html)

<sup>57</sup> Für Quellenangaben siehe Frage 8 sowie Ehret, O. und Dignum, M.: Introducing hydrogen and fuel cell vehicles in Germany (Fußnote 24).

<sup>58</sup> Geitmann, S.: Eine Erfolgsgeschichte: NIP wird bis 2026 weitergeführt, in: HZwei: Das Magazin für Wasserstoff und Brennstoffzellen, 17. Jahrgang, 2017, Heft 1, S. 7

<sup>59</sup> Der verbleibende F&E-Bedarf ist deutlich kleinteiliger als zuvor, da alle grundsätzlichen Probleme als überwunden gelten. Vergleiche [www.now-gmbh.de/content/2-nationales-innovationsprogramm/2-foerderprogramm/nip2\\_massnahmekatalog.pdf](http://www.now-gmbh.de/content/2-nationales-innovationsprogramm/2-foerderprogramm/nip2_massnahmekatalog.pdf)

Brennstoffzellenbetriebene Lkw werden heute von Herstellern wie Toyota und der amerikanischen Nicola Motor Company entwickelt.<sup>53</sup> Nach Auffassung von Bundesregierung und konsultierter Industrie stellen entsprechende Fahrzeuge wichtige Optionen für einen klimafreundlichen zukünftigen Straßengüterverkehr dar.<sup>54</sup> Kommerziell verfügbar sind solche Fahrzeuge allerdings noch nicht.

## Frage 13: Sind Brennstoffzellenfahrzeuge technisch ausgereift?

In den zwei Jahrzehnten kontinuierlicher Entwicklung von FCEVs hat sich die Technologie vom Stadium früher F&E zu alltagstauglichen Produkten entwickelt. Konnten Versuchsfahrzeuge älterer Bauart beispielsweise nur bei Temperaturen über dem Gefrierpunkt betrieben werden, verkraften aktuelle Brennstoffzellen-Pkw wie z. B. der Mirai auch  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Die Leistungsdichte der Brennstoffzelle wurde von allen Herstellern erheblich erhöht und im Falle des Mirai zwischen 2008 und 2014 mehr als verdoppelt, was erhebliche Vorteile hinsichtlich Integrierbarkeit ins Fahrzeug, Gewicht und Kosten mit sich bringt.<sup>55</sup> Daimler macht für den neuen GLC F-CELL ähnliche Angaben und berichtet von einer 30-prozentigen Verkleinerung des Brennstoffzellensystems bei gleichzeitiger 40-prozentiger Leistungssteigerung gegenüber Vorläufermodellen.<sup>56</sup>

Bei Brennstoffzellen-Pkw aller Hersteller erhöhten sich die Antriebsleistung und Höchstgeschwindigkeit, während der Kraftstoffverbrauch sank. War die Lebensdauer der Brennstoffzellen früher unzulänglich, werden heute Lebensdauern erreicht, die den Vergleichswerten konventioneller Fahrzeuge entsprechen. Wurde früher bei Pkw teils Flüssigwasserstoff mit hohen Verdampfungsverlusten verwendet, hat sich seit Jahren die verlustfreie Druckspeicherung von Wasserstoffgas durchgesetzt. Erfolgte die Speicherung zunächst bei 350 bar, ermöglicht der heutige 700-bar-Standard höhere Reichweiten und eine Betankungszeit von drei Minuten.<sup>57</sup> Die technische Zuverlässigkeit der FCEVs entspricht der konventioneller Fahrzeuge. Die Kosten des Brennstoffzellenantriebsstrangs wurden zwischen 2008 und 2016 um 75 Prozent gesenkt.<sup>58</sup>

Als Ergebnis der intensiven Entwicklungs- und Demonstrationsaktivitäten entstanden die heutigen kommerziell vertriebenen FCEVs. Die früher vorhandenen technischen Probleme sind weitestgehend gelöst und es herrscht eher Optimierungs- denn grundsätzlicher F&E-Bedarf – sonst wäre eine Serienproduktion auch gar nicht denkbar.<sup>59</sup> Dementsprechend attestieren alle oben diskutierten Anbieter von FCEVs deren Alltagstauglichkeit. Die Erfahrungsberichte von Journalisten und anderen Testfahrern bestätigen in aller Regel die Alltagstauglichkeit und das gute Fahrverhalten von FCEVs. Allerdings wird oftmals moniert, dass die tatsächliche Reichweite deutlich hinter den Herstellerangaben zurückbleibt. Dabei variieren die



in verschiedenen Fahrberichten angegebenen Reichweiten je nach Fahrweise, Route und getestetem Modell erheblich. Als grober und nicht zwischen Herstellermodellen differenzierender Richtwert erscheint eine mittlere tatsächliche Reichweite heutiger kommerzieller FCEVs von 500 km realistisch.<sup>60</sup>

Die technische Reife von Brennstoffzellenbussen kommt der von Brennstoffzellen-Pkw nahe. Noch in dem oben erwähnten CHIC-Projekt stellte die Zuverlässigkeit einzelner Modelle nicht zufrieden und verschlechterte die Gesamtbilanz. Andere Modelle hingegen erwiesen sich konventionellen Referenzfahrzeugen gegenüber als vollkommen ebenbürtig und belegen die hohe Reife der Technologie.<sup>61</sup> Andernfalls wären die laufenden großvolumigen Beschaffungsmaßnahmen für Brennstoffzellenbusse für den regulären Dienst undenkbar. Die Technologie der in Entwicklung befindlichen schweren Nutzfahrzeuge muss sich offenkundig erst noch beweisen.

## Frage 14: Welche Hürden verbleiben für die Kommerzialisierung und wie werden sie angegangen?

Einige der oben zitierten FCEV-Testfahrer kritisierten die ungenügende Anzahl und Zuverlässigkeit von Wasserstofftankstellen und verwiesen auf die Notwendigkeit eines weiteren Infrastrukturausbaus (Frage 13).

Auch die weiterhin zu hohen Kosten von FCEVs verbleiben als Problem und erklären zum guten Teil die bislang nur zögerliche Kommerzialisierung. Üblicherweise wird der breite Markteintritt neuer Technologien durch kombinierte Maßnahmen zu F&E sowie den Aufbau von Massenfertigung und Zuliefererketten befördert. In Deutschland und weltweit ergreift die Industrie entsprechende Maßnahmen und wird dabei durch öffentlich geförderte Studien und Hardwareprojekte unterstützt. Beispielsweise werden in den von Deutschland bzw. der EU geförderten Projekten „Autostack-Industrie“ und DIGIMAN kostengünstige Verfahren zur Massenfertigung automobiler Brennstoffzellen entwickelt.<sup>62</sup>

Mit der Überwindung der technologischen Hürden wächst die Bedeutung politischer Fördermaßnahmen zur Minderung der Mehrkosten von FCEVs gegenüber konventionellen Fahrzeugen. So senken die unter Frage 11 dargestellten Kaufzuschüsse der Bundesregierung die Anschaffungskosten erheblich und reduzieren den Kostennachteil deutlich. Dabei sind FCEVs hochinnovative Technologien und lassen prinzipiell eine höhere Zahlungsbereitschaft umweltbewusster und innovationsaffiner Käufergruppen (Early Adopters) erwarten. Bei Realisierung des oben ermittelten voraussichtlichen Endpreises von etwa 40.000 € für ein FCEV der nächsten Generation wäre eine Zunahme des entsprechenden Kaufinteresses zu erwarten.

<sup>60</sup> Vergleiche z. B. Efler, S.: Wo gibt's neuen Stoff?, in: ADAC motorwelt, 2017, Heft 07/08, S. 18–21, Geitmann, S.: Toyota setzt auf die Brennstoffzelle (Fußnote 36), [www.focus.de/auto/elektroauto/fahrbericht-honda-clarity-fuel-cell-das-ende-des-oels-koennte-so-aussehen-brennstoffzellen-honda-im-test\\_id\\_7073417.html](http://www.focus.de/auto/elektroauto/fahrbericht-honda-clarity-fuel-cell-das-ende-des-oels-koennte-so-aussehen-brennstoffzellen-honda-im-test_id_7073417.html), [www.wiwo.de/unternehmen/auto/honda-clarity-fuel-cell-technologie-highlight-mit-ungewisser-zukunft/19849994.html](http://www.wiwo.de/unternehmen/auto/honda-clarity-fuel-cell-technologie-highlight-mit-ungewisser-zukunft/19849994.html) und [www.zeit.de/mobilitaet/2017-07/toyota-mirai-brennstoffzelle-testfahrt/komplettansicht](http://www.zeit.de/mobilitaet/2017-07/toyota-mirai-brennstoffzelle-testfahrt/komplettansicht).

<sup>61</sup> Stolzenburg, K.: Brennstoffzellenbusse auf der Überholspur (Fußnote 54) und persönliche Mitteilung Boris Jermer, HyCologne, 10.10.2017

<sup>62</sup> [www.now-gmbh.de/de/aktuelles/presse/nip-foerderung-deutsche-industrie-bereitet-serienproduktion-von-brennstoffzellen-vor](http://www.now-gmbh.de/de/aktuelles/presse/nip-foerderung-deutsche-industrie-bereitet-serienproduktion-von-brennstoffzellen-vor) und [www.fch.europa.eu/project/digital-materials-characterisation-proof-process-auto-assembly](http://www.fch.europa.eu/project/digital-materials-characterisation-proof-process-auto-assembly)

## Frage 15: Wie ist es um die Umweltfreundlichkeit von Brennstoffzellenfahrzeugen bestellt?

Wie bereits unter Frage 9 ausgeführt, weisen FCEVs einige prinzipielle ökologische Vorteile auf. Entsprechend den Anforderungen der Energiewende ermöglichen sie die Nutzung von EE als Kraftstoff, wandeln diesen mit hoher Effizienz in Bewegungsenergie um und reduzieren so maßgeblich den Ausstoß von Treibhausgasen.<sup>63</sup> Vergleichbar einem BEV entstehen beim Fahren keinerlei Treibhausgas- oder Schadstoffemissionen und nahezu keine Antriebsgeräusche. Damit können FCEVs gerade in Städten einen wesentlichen Beitrag zur Verminderung verkehrsbedingter Emissionen und zur Erfüllung gesetzlicher Vorgaben zur Luftqualität leisten.

<sup>63</sup> Siehe die ausführliche Diskussion in Ehret, O. und Bonhoff, K.: Hydrogen as a fuel and energy storage (Fußnote 18)

Für die Ermittlung während des Fahrbetriebs anfallender Emissionen sind laut herrschender Gesetzgebung lediglich Tank-to-Wheel-Emissionen relevant, die nur direkt im Fahrzeug entstehende Abgase berücksichtigen. Somit gelten Elektrofahrzeuge als Null-Emissions-Fahrzeuge, da bei der Herstellung von Strom bzw. Wasserstoff anfallende Emissionen nicht angerechnet werden. Wesentlich aussagekräftiger hinsichtlich des tatsächlichen Umweltverhaltens sind Well-to-Wheel-Emissions- und Energiebilanzen, die zusätzlich die während der Produktion, Verteilung und Abgabe von Kraftstoffen entstehenden Emissionen und Energieverbräuche berücksichtigen. Die nachfolgende Grafik<sup>64</sup> vergleicht Well-to-Wheel-Treibhausgasemissionen und -Energieverbräuche elektrisch, fossil und mit Biokraftstoffen betriebener Fahrzeuge.<sup>65</sup>

<sup>64</sup> Bildquelle: Dr. Jörg Wind, Daimler AG, 06.09.2017

<sup>65</sup> Die Grafik basiert auf international anerkannten und in Zusammenarbeit von Europäischer Kommission und der Mineralöl- sowie Automobilindustrie erhobenen Daten. Der zentrale Bericht findet sich unter [iet.jrc.ec.europa.eu/about-jec/sites/iet.jrc.ec.europa.eu/about-jec/files/documents/report\\_2014/wtt\\_report\\_v4a.pdf](http://iet.jrc.ec.europa.eu/about-jec/sites/iet.jrc.ec.europa.eu/about-jec/files/documents/report_2014/wtt_report_v4a.pdf).

Es zeigt sich, dass die Well-to-Wheel-Treibhausgasemissionen sowohl von FCEVs- wie auch BEVs wesentlich geringer als die von Diesel- und Benzinfahrzeugen sind. Gegenüber Biokraftstoffen punkten Elektroautos mit einer deutlich überlegenen Energieeffizienz. Aufgrund der Kombination niedriger Emissionen und hoher Effizienz können Elektroautos als besonders umweltfreundlich gelten.

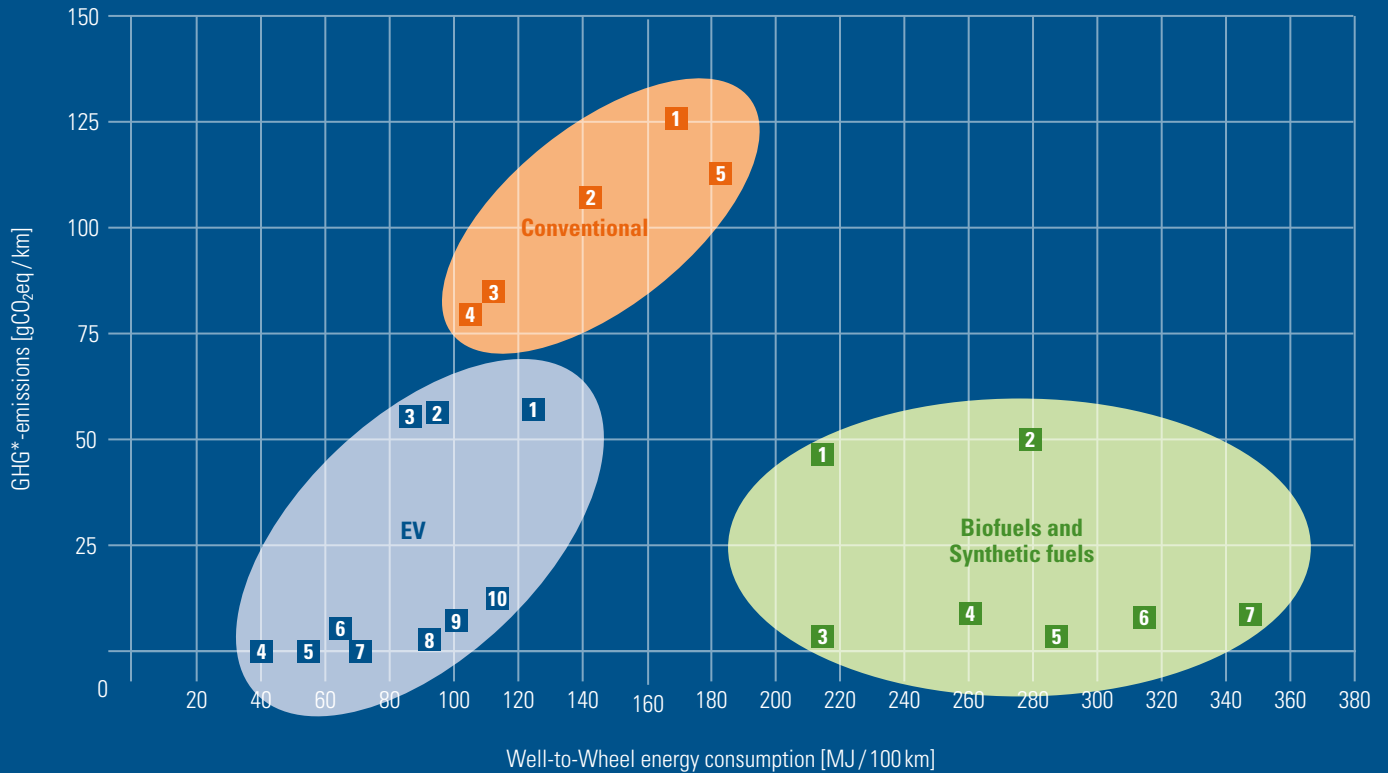
<sup>66</sup> Allerdings wirkt sich die sehr energieintensive Herstellung von Batterien negativ auf die Umweltbilanz aus ([www.forum-qualitaetsjournalismus.de/wp-content/uploads/2016/05/FQJ.dossier-Elektromobilit%C3%A4t.pdf](http://www.forum-qualitaetsjournalismus.de/wp-content/uploads/2016/05/FQJ.dossier-Elektromobilit%C3%A4t.pdf)).

Da die Herstellung von Fahrzeugen jedoch nicht in Well-to-Wheel-Bilanzen eingeht, kann sie hier nicht systematisch behandelt werden.

Die Detailbetrachtung von Elektrofahrzeugen ergibt, dass FCEVs wie auch BEVs insbesondere beim Einsatz von EE extrem geringe Treibhausgasemissionen aufweisen, wobei BEVs noch weniger als FCEVs emittieren. Bei Nutzung fossiler Energien verschlechtert sich die Emissionsbilanz. Sowohl BEVs wie auch FCEVs verbrauchen sehr wenig Energie, wobei die Effizienz von BEVs wiederum besser als die von FCEVs ist. Die Umweltvorteile von BEVs liegen darin begründet, dass bei der Herstellung des Kraftstoffs und dessen Nutzung im Fahrzeug weniger verlustbehaftete Schritte der Energiewandlung anfallen.<sup>66</sup>



# Well-to Wheel Comparison of Greenhouse Gas Emissions and Energy Consumption of EUCAR Reference Vehicles (C-segment passenger car) 2020+



**1** Gasoline (Crude oil)

**2** Diesel (Crude oil)

**3** Gasoline Hybrid (Crude oil)

**4** Diesel Hybrid (Crude oil)

**5** CNG (Compressed Natural Gas)

**1** BEV (EU-Mix)

**2** FCEV (Natural Gas)

**3** BEV (Natural Gas)

**4** BEV (Wind)

**5** Pump Storage

**6** Hybridisation FC-Powertrain (Plug-In)

**7** H<sub>2</sub>-Cavern storage

**8** BEV (Biomass)

**9** FCEV (Wind)

**10** FCEV (Biomass)

**1** DICI (Biodiesel FAME)

**2** DISI (Ethanol Wheat)

**3** Syn. Diesel from ren. Energy, CO<sub>2</sub> from exhaust gas

**4** DICI (BTL Wood)

**5** Syn. Diesel from ren. Energy (CO<sub>2</sub> from air)

**6** PISI CNG (H<sub>2</sub> from ren. Energy, CO<sub>2</sub> from Biogas)

**7** PISI CNG (H<sub>2</sub> from ren. Energy, CO<sub>2</sub> from air)

\*GHG: Green house gas

## Frage 16: Sind Brennstoffzellenfahrzeuge Teil der Elektromobilität?

<sup>67</sup> Siehe Daimler-Vortrag „Antriebssysteme für elektrisch angetriebene Fahrzeuge“ anlässlich des EnergieSpeicher Symposiums des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) Stuttgart 2012 ([www.dlr.de/tt/Portaldata/41/Resources/dokumente/ess\\_2012/Wind\\_Antriebssysteme\\_elektrische\\_Fahrzeuge.pdf](http://www.dlr.de/tt/Portaldata/41/Resources/dokumente/ess_2012/Wind_Antriebssysteme_elektrische_Fahrzeuge.pdf)).

<sup>68</sup> Die Bauart der Batterien ist der anderer Elektrofahrzeuge vergleichbar, die Energiespeicherkapazität aber v. a. gegenüber reinen BEVs deutlich geringer.

<sup>69</sup> [nationale-plattform-elektromobilitaet.de/hintergrund/der-ansatz/#tabs](http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/hintergrund/der-ansatz/#tabs)

<sup>70</sup> [www.now-gmbh.de/de/nationales-innovationsprogramm/foerderprogramm](http://www.now-gmbh.de/de/nationales-innovationsprogramm/foerderprogramm)

<sup>71</sup> [www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/K/zehn-jahre-elektromobilitaet.html](http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/K/zehn-jahre-elektromobilitaet.html)

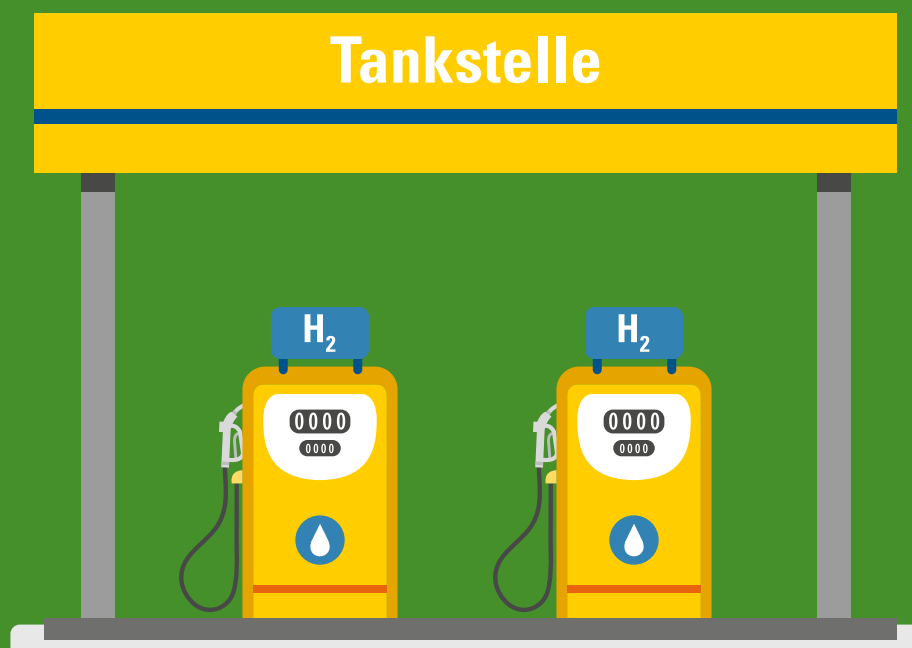
<sup>72</sup> [www.bmub.bund.de/themen/luft-laerm-verkehr/verkehr/elektromobilitaet](http://www.bmub.bund.de/themen/luft-laerm-verkehr/verkehr/elektromobilitaet) und [www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Elektromobilitaet/elektromobilitaet\\_node.html](http://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Elektromobilitaet/elektromobilitaet_node.html)

Der Antrieb von FCEVs erfolgt elektrisch und der Antriebsstrang setzt sich überwiegend aus elektrischen bzw. elektrochemischen Bauteilen zusammen (Frage 8). FCEVs nutzen viele den reinen BEVs entsprechende bzw. baugleiche Komponenten wie z. B. Elektromotor oder Supercaps für die Rückgewinnung von Bremsenergie. FCEVs und BEVs werden von den Herstellern mit Blick auf eine möglichst weitgehende Verwendung identischer Komponenten konstruiert, wie das z. B. bei den Elektrofahrzeugen F-CELL und E-CELL von Daimler der Fall war.<sup>67</sup> Alle heutigen FCEVs sind Hybridfahrzeuge und verfügen über eine durch die Leistungselektronik eingebundene Batterie, die einen verschleißarmen Betrieb der Brennstoffzelle ermöglicht und die vielfältigen Energieflüsse im Fahrzeug harmonisiert.<sup>68</sup> Was Antriebssystem und verbaute Komponenten betrifft, sind FCEVs also klar der Elektromobilität zuzuordnen.

In der politischen Diskussion hingegen wird das Verständnis der Elektromobilität weitgehend auf BEVs verengt. Die von der Bundesregierung initiierte und für den Markthochlauf von Elektrofahrzeugen bedeutsame Nationale Plattform Elektromobilität konzentriert sich auf BEVs mit und ohne Range Extender sowie Plug-in-Hybride. Die Plattform macht die Aufladung am Stromnetz zur Bedingung ihrer Definition von Elektrofahrzeugen bzw. Elektromobilität und weist FCEVs nur eine randständige Rolle zu.<sup>69</sup> Grundsätzlich ist die Auffassung der Bundesregierung aber technologie-neutral und lässt Raum für den Einschluss der Brennstoffzelle in die Elektromobilität. So fördert der Bund seit 2006 die Marktvorbereitung von FCEVs und Wasserstoffinfrastruktur im NIP.<sup>70</sup> Wie schon seine Vorgänger bezeichnete der amtierende Bundesminister für Verkehr und digitale Infrastruktur Ende 2016 die Brennstoffzelle explizit als Schlüsseltechnologie der Elektromobilität.<sup>71</sup> Rechtlich verbindlich zeigt sich die Sichtweise der Regierung sowohl im Elektromobilitätsgesetz von 2015 als auch im Umweltbonus von 2016: FCEVs profitieren von den Privilegien hinsichtlich Fahrzeugnutzung ebenso wie von den Kaufprämien zur Förderung des Absatzes von Elektrofahrzeugen.<sup>72</sup> Auch politisch sind FCEVs damit Teil der Elektromobilität.

### 3. Wasserstoff und Infrastruktur für den Straßenverkehr

Der dritte Themenkomplex widmet sich der Bereitstellung von Wasserstoff als Kraftstoff für den Straßenverkehr. Verschiedene Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff v. a. auf Basis von EE werden vorgestellt. Die ökologischen Auswirkungen eines breiten Einsatzes von Wasserstoff im Verkehr werden abgeschätzt. Schließlich wird der laufende Aufbau der Wasserstoff-Betankungsinfrastruktur in Deutschland geschildert.



## Frage 17: Wie wird Wasserstoff als Kraftstoff für den Straßenverkehr hergestellt?

<sup>73</sup> Adolf, J. et al.: Shell Wasserstoff-Studie (Fußnote 1)

Wasserstoff kann mit einer Vielzahl von Verfahren auf Basis fossiler wie auch erneuerbarer Energien produziert werden. Bislang wird der bei Weitem größte Teil des weltweit hergestellten Wasserstoffs in industriellen Prozessen v. a. für die Produktion von Ammoniak, erdölbasierten Treibstoffen und Methanol genutzt. Der Wasserstoff wird zu möglichst geringen Kosten auf Basis fossiler Energien und in großen, zentralen Produktionsanlagen hergestellt.<sup>73</sup> Das Bild ändert sich allerdings mit der global stark wachsenden Bedeutung des Klimaschutzes und EE. Einerseits halten EE sektorenübergreifend Einzug auch in bislang klar fossil dominierte Bereiche, andererseits gewinnt Wasserstoff als Kraftstoff für FCEVs erheblich an Relevanz (Fragen 7 und 32 bis 35). International verlangt eine immer strengere Abgasgesetzgebung, auch die Schadstoff- und Treibhausgasemissionen des Verkehrs zu verringern. Dies begünstigt eine Wasserstoffherstellung auf Basis von EE und lässt längerfristig eine Dominanz von EE-Wasserstoff in der Mobilität erwarten.

Für eine kohlenstofffreie bzw. -arme Wasserstoffherstellung sind insbesondere zwei Verfahren bedeutsam: die Wasserelektrolyse auf Basis erneuerbaren Stroms und die Dampfreformierung von Erd- oder Biogas. Die Elektrolyse ist bislang von vergleichsweise geringer kommerzieller Relevanz und ihr Anteil an der weltweiten Wasserstoffproduktion ist marginal. Allerdings gilt sie als die Zukunftstechnologie nachhaltiger Wasserstoffherstellung und das strategische Interesse einschlägiger Akteure ist entsprechend groß. Demgegenüber ist die Dampfreformierung ein Schwergewicht unter den etablierten Produktionsverfahren und die in Deutschland mit Abstand bedeutsamste Technologie. Neben Elektrolyse und Reformierung werden oftmals die Wasserstoffproduktion auf Basis von Biomasse sowie die Nutzung industriellen Nebenproduktwasserstoffs als umweltschonende Bereitstellungsoptionen genannt. Allerdings sind biomassebasierte Verfahren noch weitgehend Gegenstand der F&E und kommerziell nur perspektivisch relevant.<sup>74</sup> Nebenproduktwasserstoff hingegen bietet nur begrenzte Umweltvorteile und wird immer knapper.<sup>75</sup> Daher werden die letztgenannten Pfade hier nicht weiter betrachtet.

<sup>74</sup> [www.nip-konferenz.de/programm/vortraege/16\\_Ehret-H2Bereitstellung\\_FINAL.pdf](http://www.nip-konferenz.de/programm/vortraege/16_Ehret-H2Bereitstellung_FINAL.pdf)

<sup>75</sup> Adolf, J. et al.: Shell Wasserstoff-Studie (Fußnote 1)

Die Wasserelektrolyse umfasst drei Unterarten mit jeweils unterschiedlichem technologischem Aufbau und marktlicher Reife. Die alkalische Elektrolyse ist die bei Weitem älteste Technologie. Sie hat sich in lang dauernden Einsätzen bewährt und zeichnet sich v. a. durch ihre vergleichsweise geringen Investitionskosten aus. Die Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyse (PEMEL) etabliert sich erst seit wenigen Jahren als kommerziell einsatzbereite Technologie, erweckt aber angesichts ihrer großen Entwicklungspotenziale besonderes Interesse. Zu ihren Vorzügen gehören eine ausgeprägte Lastflexibilität und geringe Baugröße, die sie für die Nutzung fluktuierender EE und den dezentralen Einsatz z. B. an Wasserstofftankstellen

qualifizieren. Die Hochtemperatur-Festelektrolyt-Elektrolyse befindet sich noch im F&E-Stadium und muss ihre Alltagstauglichkeit erst noch beweisen. Insbesondere aufgrund ihrer sehr hohen Energieeffizienz ist die Technologie jedoch bereits heute für kommerzielle Akteure von Interesse. Allen Elektrolysearten gemein ist die Aufspaltung von Wasser in dessen Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff mithilfe elektrischer Energie.<sup>76</sup> Wird EE-Strom für den Betrieb der Anlagen verwendet, verursacht der Wasserstoffproduktionsprozess keine Treibhausgas- oder Schadstoffemissionen. Bei Nutzung fossilen Stroms verschlechtert sich die Treibhausgasbilanz allerdings deutlich. Die folgende Abbildung stellt die Funktionsprinzipien eines PEM-Elektrolyseurs dar.<sup>77</sup>

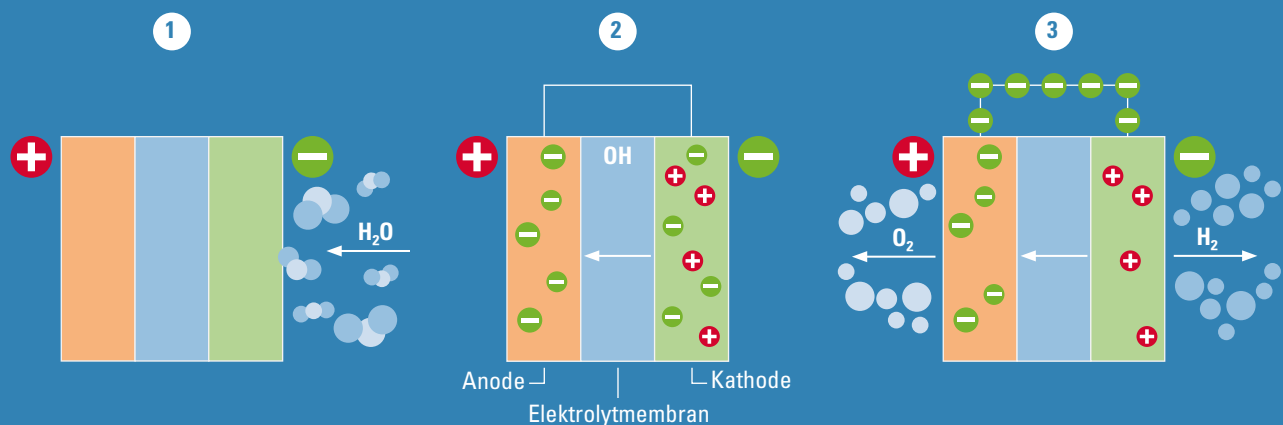
Die Dampfreformierung ist ein ebenso bewährtes wie kostengünstiges Verfahren der Wasserstoffproduktion. Weit überwiegend wird dabei Erdgas in großen, zentralen Anlagen umgesetzt, obgleich auch Biogas genutzt werden kann. Bei sehr hohen Temperaturen und in mehreren Schritten wird das Gas in seine Bestandteile zerlegt und schließlich reiner Wasserstoff extrahiert. Da schon das eingesetzte Erdgas wenig Kohlenstoff enthält, ist die Erdgasreformierung von allen fossilen Pfaden der Wasserstoffgewinnung derjenige mit der besten Umweltbilanz. Auch bei Nutzung erdgasbasierten Wasserstoffs in FCEVs ergeben sich deutliche Emissionsminderun-

<sup>76</sup> Smolinka, T.: H<sub>2</sub>-Erzeugung durch Wasserelektrolyse: Entwicklungstrends und Herstellerübersicht, in: HZwei: Das Magazin für Wasserstoff und Brennstoffzellen, 17. Jahrgang, 2017, Heft 2, S. 19–22

<sup>77</sup> Bildquelle: [cleanenergypartnership.de/fileadmin/Assets/user\\_upload/CEP\\_Erklaerblatt.pdf](https://cleanenergypartnership.de/fileadmin/Assets/user_upload/CEP_Erklaerblatt.pdf)

## Die Wasserelektrolyse

Das Prinzip des Elektrolyseurs: Der Elektrolyseur dient zur Erzeugung von Wasserstoff. Aus Wasser und Strom werden Wasserstoff und Sauerstoff.



- 1** Zunächst wird dem Elektrolyseur dazu der Ausgangsstoff Wasser zugeleitet und eine elektrische Spannung angelegt.
- 2** Am Minuspol, der Kathode, werden Elektronen abgegeben. Hier werden aus Wasser  $OH^-$ -Ionen und Wasserstoff. Die Ionen wandern durch eine nur für sie durchlässige Elektrolytmembran und geben am Pluspol, der Anode, die überschüssigen Elektronen wieder ab.
- 3** Hier entstehen Sauerstoff und etwas Wasser. Dabei sammelt sich das Wasserstoffgas an der Kathode und das Sauerstoffgas an der Anode. Die eingesetzte elektrische Energie wird als chemische Energie im Wasserstoff gespeichert. Der entgegengesetzte Prozess findet in der Brennstoffzelle statt

<sup>78</sup> [www.e-mobilbw.de/files/e-mobil/content/DE/Publikationen/PDF/Wasserstoff-Infrastruktur%20fuer%20eine%20nachhaltige%20Mobilitaet%20-%20final\\_WEB.pdf](http://www.e-mobilbw.de/files/e-mobil/content/DE/Publikationen/PDF/Wasserstoff-Infrastruktur%20fuer%20eine%20nachhaltige%20Mobilitaet%20-%20final_WEB.pdf)

gen im Vergleich zu verbrennungsmotorischen Fahrzeugen. Durch den Einsatz von Biogas lässt sich die Umweltbilanz der Dampfreformierung weiter verbessern.<sup>78</sup>

Wie verschiedene Studien zeigen, ist bereits heute die Bereitstellung großer Mengen kohlenstofffreien bzw. -armen Wasserstoffs möglich. Angesichts der noch geringen Zahl von FCEVs kann damit die Kraftstoffnachfrage des Verkehrs auf absehbare Zeit problemlos gedeckt werden. Erst bei einem deutlich dynamischeren Zuwachs des weltweiten FCEV-Bestands, wie er z. B. in den unter Frage 20 referierten Studien antizipiert wird, erfordert die Bereitstellung ausreichender Mengen klimaneutralen Wasserstoffs den Zubau von EE-Erzeugungskapazitäten. Die Kommerzialisierung der Wasserelektrolyse muss allerdings schon heute forciert werden, um der wachsenden Wasserstoffnachfrage des Verkehrs und anderer Sektoren entsprechen zu können.

## Frage 18: Wie wird Wasserstoffkraftstoff verteilt?

Tendenziell handelt es sich bei Wasserelektrolyseuren um kleinere Anlagen eher geringer Leistung, die besonders für den dezentralen Einsatz, v. a. an Tankstellen, geeignet sind. Allerdings werden zunehmend auch größere Systeme im mehrstelligen Megawattbereich realisiert, die der zentralen Versorgung mehrerer Verbraucher dienen. Demgegenüber spielen kleinere Dampfreformer für den dezentralen Einsatz zumindest in Europa nahezu keine Rolle. Wird Wasserstoff dezentral hergestellt, erfolgt die Nutzung vor Ort und ein weiterer Transport entfällt.

Bei zentraler Produktion hingegen ist ein Transport vonnöten, bei dem Wasserstoff entweder in speziellen Lkw oder in Pipelines zum Verbrauchsort befördert wird. Kleinere Mengen werden gewöhnlich als komprimiertes Gas in den Trailer genannten Lkw transportiert, sofern die zu bewältigende Entfernung nicht allzu groß ist. Bei mittleren Mengen und längeren Wegstrecken wird der Wasserstoff verflüssigt und mit größerer Energiedichte in einem entsprechend ausgelegten Trailer befördert. Pipelines unterschiedlicher Länge sind besonders für den Transport großer Mengen geeignet und werden v. a. in industriellen Zusammenhängen genutzt. Perspektivisch könnten Pipelinenetze auch ausgebaut werden und dem Transport von Wasserstoff für den Verkehrssektor dienen.<sup>79</sup> Bislang erfolgt die Versorgung von Wasserstoff-tankstellen allerdings per Trailer oder Vor-Ort-Produktion. Seit einiger Zeit werden auch flüssige Wasserstoffträger, bekannt unter dem Namen Liquid Organic Hydrogen Carriers, als Transportoption diskutiert. Die Praxistauglichkeit dieser Stoffe muss sich aber erst noch erweisen.<sup>80</sup>

<sup>79</sup> [h2-mobility.de/wp-content/uploads/2017/10/EVS-Handout\\_Studie\\_2017-10-10.pdf](http://h2-mobility.de/wp-content/uploads/2017/10/EVS-Handout_Studie_2017-10-10.pdf)

<sup>80</sup> Adolf, J. et al.: Shell Wasserstoff-Studie (Fußnote 1)



## Frage 19: Was sind die Zielsetzungen des Energiekonzepts im Verkehrsbereich und inwieweit wurden sie bislang erreicht?

Das Energiekonzept der Bundesregierung von 2010 zielt auf die Verwirklichung einer umweltschonenden, zuverlässigen und bezahlbaren Energieversorgung. Zur Begrenzung des globalen Klimawandels werden drastische Verminderungen des Ausstoßes von Treibhausgasen, der weitgehende Ersatz fossiler Energien durch EE sowie eine deutliche Verminderung des Endenergieverbrauchs angestrebt: So sollen die gesamtwirtschaftlichen Treibhausgasemissionen bis 2020 um 40 Prozent und bis 2050 um 80 bis 95 Prozent sinken. Bis 2050 soll auch der EE-Anteil am gesamten Endenergieverbrauch auf 60 Prozent steigen und der Primärenergieverbrauch um 50 Prozent zurückgehen. Speziell für den Verkehrssektor wird eine Verminderung des Endenergieverbrauchs um 10 Prozent bis 2020 und um 40 Prozent bis 2050 angestrebt.<sup>81</sup> Der Zielkatalog wurde später um die Erhöhung des Anteils Erneuerbarer im Verkehr auf 10 Prozent bis 2020 erweitert.

Demgegenüber zeigen verschiedene Monitoring-Berichte zur Energiewende, dass der Verkehrssektor bislang die Erreichung der vorgegebenen Ziele deutlich verfehlt: Die Vorgaben zur Reduzierung des Energieverbrauchs und zur Steigerung des EE-Anteils bis 2020 werden nicht erreicht; im Gegenteil sind eine Erhöhung des Energieverbrauchs und ein Rückgang des EE-Anteils zu verzeichnen.<sup>82</sup> Obgleich auch in anderen Bereichen die Bilanz der Zielerreichung gemischt ausfällt, kann der Verkehrssektor als das „Sorgenkind“ der Energiewende gelten. Im Zuge des Abgaskandals wurde überdies deutlich, dass gesetzliche Vorgaben zur Begrenzung von Schadstoffemissionen in großem Ausmaß missachtet wurden. Somit werden neben den klimarelevanten Zielsetzungen auch lokal für Umwelt und Gesundheit wichtige Vorgaben verfehlt.

Wie unter Fragen 15 und 17 dargelegt, lässt sich durch FCEVs die Umweltbilanz des Straßenverkehrs wesentlich verbessern: Zum einen ermöglicht Wasserstoff die Einbringung von EE in den Verkehrsbereich. Zum anderen trägt die hohe Effizienz der Brennstoffzelle unmittelbar zur Minderung des Energieverbrauchs bei. Schließlich verursachen FCEVs bei Nutzung von EE-Wasserstoff nur sehr geringe Treibhausgasemissionen und stoßen lokal in keinem Fall Schadstoffe aus. Damit zahlen FCEVs direkt auf die Zielsetzungen der Energiewende ein. Die Auswirkungen dieser prinzipiellen Gegebenheiten auf nationale und globale Emissionsbilanzen werden in mehreren nachfolgend referierten Studien untersucht.

<sup>81</sup> [www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiekonzept-2010.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiekonzept-2010.pdf?__blob=publicationFile&v=3)

<sup>82</sup> [www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/fuenfter-monitoring-bericht-energie-der-zukunft-kurzfassung.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=20](http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/fuenfter-monitoring-bericht-energie-der-zukunft-kurzfassung.pdf?__blob=publicationFile&v=20)

## Frage 20: Welche ökologischen Folgen hätte ein breiter Einsatz von Wasserstoff in Deutschland und global?

<sup>83</sup> [www.now-gmbh.de/content/7-service/4-publikationen/4-nip-wasserstoff-und-brennstoffzellentechnologie/germanhy\\_-\\_ueberleitung\\_der\\_ergebnisse\\_in\\_das\\_emissionsb.pdf](http://www.now-gmbh.de/content/7-service/4-publikationen/4-nip-wasserstoff-und-brennstoffzellentechnologie/germanhy_-_ueberleitung_der_ergebnisse_in_das_emissionsb.pdf)

Die Studie „Überleitung der Ergebnisse aus GermanHy in das Emissionsberechnungsmodell TREMOD“ analysiert die Szenarien der zuvor veröffentlichten Studie „GermanHy“ und integriert sie anschließend in TREMOD (Transport Emission Model).<sup>83</sup> „GermanHy“ hatte verschiedene für die Markteinführung von FCEVs relevante Wasserstoffgestehungs- und -nutzungspfade analysiert und mögliche Emissionsminderungen ermittelt. Durch die Überführung der Daten in TREMOD, das methodisch ausgefeilte Emissionsberechnungsmodell der Bundesregierung, wird eine weit genauere Auswertung möglich. Die Modellierung bestätigt und spezifiziert die „GermanHy“-Ergebnisse dahin gehend, dass die breite Markteinführung von FCEVs und anderen Elektrofahrzeugen signifikante Effizienzsteigerungen sowie eine erhebliche Verminderung von Treibhausgas- und Schadstoffemissionen ermöglicht. Der Energieverbrauch des Straßenverkehrs kann bis 2050 um etwa 70 Prozent, der Treibhausgasausstoß um über 80 Prozentde vermindert werden. Wie ein Vergleich mit den Zielen des Energiekonzepts für den Verkehr zeigt, wird die geforderte 40-prozentige Minderung des Energieverbrauchs weit übererfüllt. Auch das gesamtwirtschaftliche Ziel einer 80- bis 95-prozentigen Reduzierung von Treibhausgasemissionen wird erreicht. Der in den Verkehr eingebrachte Anteil der EE liegt deutlich über den geforderten 10 Prozent.

<sup>84</sup> [www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapHydrogenandFuelCells.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapHydrogenandFuelCells.pdf)

Einen anderen Ansatz wählt die von der Internationalen Energieagentur (IEA) herausgegebene „Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells“: Sie analysiert top-down, welche Umwelteffekte sich durch eine weltweit forcierte Markteinführung bzw. -durchdringung von FCEVs erzielen lassen.<sup>84</sup> Grundlage ist ein politisch bedeutendes Szenario der IEA, das Wege zur Begrenzung der Erderwärmung auf 2 °C bis 2050 aufzeigt und im Sinne einer verstärkten Berücksichtigung von Wasserstofftechnologien modifiziert wird. Unter gegebenen Rahmenbedingungen wird ermittelt, welchen Beitrag der Verkehrssektor zur Erreichung des 2- °C-Ziels leisten muss und wie dieser Beitrag mittels Wasserstofftechnologien erbracht werden kann. Entscheidungsträger werden über die Kernelemente möglicher Diffusionsprozesse wie folgt informiert: Bis 2050 wächst der Bestand von FCEVs in den USA, Japan und Europa auf insgesamt 113 Millionen. Dadurch entsteht ein jährlicher Wasserstoffbedarf von etwa 10 Millionen Tonnen, der auf Basis erneuerbarer und kohlenstoffarmer anderer Energien gedeckt wird. Durch den Ersatz benzinbetriebener Pkw lassen sich dann bis zu 190 Millionen Tonnen Kohlendioxid pro Jahr einsparen. Angesichts der umweltpolitischen Notwendigkeit, wirksame Maßnahmen des Klimaschutzes zu ergreifen, empfiehlt die Roadmap konkrete Schritte zur Realisierung des Szenarios.

## Frage 21: Wie wurde der Grundstock an Betankungsinfrastruktur für Brennstoffzellenfahrzeuge in Deutschland geschaffen?

Zwischen 2002 und Ende 2016 wurde Wasserstoffinfrastruktur für die Betankung von FCEVs in Deutschland primär im Rahmen der CEP aufgebaut. Während anfangs Tankstellen mit 350-bar-Druckbetankung sowie einige Flüssigwasserstoff-Tankanlagen entwickelt und erprobt wurden, setzte sich für Pkw ab 2008 die 700-bar-Druckbetankung durch, die eine vollständige Fahrzeugbetankung in drei Minuten ermöglichte.<sup>85</sup> Zu der ursprünglichen CEP-Region Berlin kamen im Laufe der Zeit Hamburg, Nordrhein-Westfalen, Baden-Württemberg und Hessen hinzu. In diesen Regionen wurden jeweils mehrere Tankstellen errichtet und betrieben und das Netz durch weitere Tankstellen in Verbindungskorridoren zwischen den Regionen ergänzt. Neben Pkw-Tankanlagen wurden auch größer dimensionierte 350-bar-Druckbetankungsanlagen für Busse erprobt. Infrastruktureitig waren in der CEP v. a. Mineralöl-, Gase- und Energieunternehmen beteiligt, die Initiative wurde von der Bundesregierung als Leuchtturmprojekt im NIP finanziell unterstützt.<sup>86</sup>

Bis Ende 2016 wurden 30 öffentlich zugängliche Tankstellen errichtet und etwa 25 weitere Anlagen befanden sich im Bau oder fortgeschrittener Planung. Aufgrund ausstehender Genehmigungen und Wartungs- oder Reparaturarbeiten waren nicht alle der fertiggestellten Tankstellen betriebsbereit.<sup>87</sup> Die Tankstellen wurden als F&E- bzw. Demonstrationsanlagen erprobt und unterschieden sich hinsichtlich Aufbau und Zuverlässigkeit erheblich. Die Anlagen wurden von den CEP-Partnern kontinuierlich verbessert und neue Tankstellen wiesen im Allgemeinen eine deutlich bessere Leistung und Verfügbarkeit als Altanlagen auf. Der Wasserstoff wurde für 9,50 € pro Kilogramm abgegeben. Da der Verbrauch eines modernen FCEV bei etwa 1 kg auf 100 km liegt, entstehen Kraftstoffkosten von unter 10,00 € pro 100 km. Damit sind die Kraftstoffkosten von FCEVs grob vergleichbar mit denen konventioneller Pkw.

## Frage 22: Werden erneuerbare Energien für die Herstellung von Wasserstoff genutzt?

Die Bundesregierung unterstützt nachdrücklich die Verwendung EE als Kraftstoff sowohl für BEVs- wie auch FCEVs. Zusätzlich verlangt europäisches Recht den Einsatz regenerativer Energien im Verkehrsbereich und erkennt Strom ebenso wie Wasserstoff, sofern auf EE-Basis hergestellt, als regenerative Kraftstoffe an. Da die Anbieter von Kraftstoffen gesetzlich vorgegebene Quoten für EE-Kraftstoffe erfüllen müssen, entsteht ein wesentlicher Anreiz, Elektrofahrzeuge aller Art mit regenerativen Kraftstoffen zu betreiben.<sup>88</sup> In der CEP wurde dementsprechend der Einsatz von

<sup>85</sup> [www.now-gmbh.de/content/7-service/4-publikationen/4-nip-wasserstoff-und-brennstoffzellentechnologie/cep\\_abschlussdokumentation\\_de.pdf](http://www.now-gmbh.de/content/7-service/4-publikationen/4-nip-wasserstoff-und-brennstoffzellentechnologie/cep_abschlussdokumentation_de.pdf)

<sup>86</sup> [www.now-gmbh.de/content/1-aktuelles/1-presse/20161214-nip-erfolgreiche-bilanz/4\\_lang\\_infrastruktur\\_final.pdf](http://www.now-gmbh.de/content/1-aktuelles/1-presse/20161214-nip-erfolgreiche-bilanz/4_lang_infrastruktur_final.pdf)

<sup>87</sup> Geitmann, S.: H<sub>2</sub>-Infrastruktur wächst weiter: ... aber nicht alle Stationen sind betriebsbereit, in: HZwei: Das Magazin für Wasserstoff und Brennstoffzellen, 17. Jahrgang, 2017, Heft 1, S. 24

<sup>88</sup> Vergleiche [www.certifyh.eu](http://www.certifyh.eu)



<sup>89</sup> [www.now-gmbh.de/  
content/1-aktuelles/1-presse/  
20161214-nip-erfolgreiche-  
bilanz/7\\_zoerner\\_produktion.pdf](http://www.now-gmbh.de/content/1-aktuelles/1-presse/20161214-nip-erfolgreiche-bilanz/7_zoerner_produktion.pdf)

mindestens 50 Prozent regenerativen Wasserstoffs verlangt. Eine Reihe von Tankstellen stellte vor Ort mittels Wasserelektrolyse Wasserstoff her, andere Tankstellen gaben in entfernten Anlagen produzierten Wind- oder Biowasserstoff ab.<sup>89</sup> Es ist davon auszugehen, dass auch zukünftig ein wesentlicher Teil des Wasserstoffs erneuerbaren Ursprungs sein wird und die damit verbundenen Umweltvorteile zur Geltung kommen können.

<sup>90</sup> Bildquelle: [www.now-gmbh.de/  
content/7-service/  
4-publikationen/2-now-  
jahresberichte/now\\_  
jahresbericht\\_2016.pdf](http://www.now-gmbh.de/content/7-service/4-publikationen/2-now-jahresberichte/now_jahresbericht_2016.pdf)

Die obenstehende Abbildung zeigt die im Rahmen der CEP errichtete Wasserstofftankstelle HafenCity Hamburg, die per Wasserelektrolyse und zertifiziertem Ökostrom Wasserstoff vor Ort produziert und an Pkw und Busse abgibt.<sup>90</sup>

## Frage 23: Wie erfolgt der Aufbau kommerzieller Wasserstoffinfrastruktur im Rahmen von H<sub>2</sub> MOBILITY?

Spätestens Anfang 2017 übernahm die H<sub>2</sub> MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG eine zentrale Rolle beim Aufbau der Wasserstoffinfrastruktur für Pkw in Deutschland. Hatten bislang Unternehmen im Rahmen der CEP vorkommerzielle Tankstellen entwickelt, errichtet und erprobt, so zielt H<sub>2</sub> MOBILITY auf den flächendeckenden Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur in der frühen Marktphase. Das Unternehmen





wurde 2015 von den Firmen Air Liquide, Daimler, Linde, OMV, Shell und TOTAL gegründet. Die Automobilbauer BMW, Honda, Hyundai, Toyota und Volkswagen stimmen als assoziierte Partner ihre marktbezogenen Planungen für FCEVs mit den sechs Gesellschaftern ab. Die Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, die als Vertreter der Bundesregierung bei der Umsetzung von Fördermaßnahmen schon in der CEP zentral war, berät H<sub>2</sub> MOBILITY in politischen Fragen.<sup>91</sup>

Die Aufgabe von H<sub>2</sub> MOBILITY ist es, den Markteintritt von Brennstoffzellen-Pkw in Deutschland durch den Aufbau eines Netzes von 700-bar-Wasserstofftankstellen zu ermöglichen. Die Zahl der öffentlich zugänglichen Tankstellen soll von 43 Ende 2017 auf 100 in den Jahren 2018/19 und auf 400 bis 2023 steigen und so eine flächendeckende Wasserstoffgrundversorgung sicherstellen, die später weiter ausgebaut werden kann.<sup>92</sup> Während die bis 2018/19 geplanten Tankstellen in jedem Fall gebaut werden sollen, wird der weitere Ausbau bis 2023 auch von den Zulassungszahlen von FCEVs abhängig gemacht. Die Ausbauplanungen wurden von H<sub>2</sub> MOBILITY entwickelt, behalten aber einige Grundprinzipien der CEP bei. Tankstellen sollen zunächst v. a. in Ballungszentren entstehen und zudem in Verbindungskorridoren z. B. entlang Autobahnen deutschlandweite Fahrten ermöglichen. Daneben soll eine begrenzte Anzahl von Tankstellen in weniger zentralen Regionen errichtet werden. H<sub>2</sub> MOBILITY ist auch für den Betrieb der Tankstellen verantwortlich.<sup>93</sup> Wasserstoff

<sup>91</sup> h2-mobility.de

<sup>92</sup> [www.now-gmbh.de/de/aktuelles/presse/neue-wasserstoffstation-in-hirschberg](http://www.now-gmbh.de/de/aktuelles/presse/neue-wasserstoffstation-in-hirschberg)

<sup>93</sup> Bildquelle:  
[www.now-gmbh.de/content/7-service/4-publikationen/2-now-jahresberichte/nw\\_jahresbericht\\_2016.pdf](http://www.now-gmbh.de/content/7-service/4-publikationen/2-now-jahresberichte/nw_jahresbericht_2016.pdf)

wird weiterhin für 9,50€ pro Kilogramm verkauft und soll auf steigenden Anteilen von EE basieren.

Aktuellen Planungen zufolge übernimmt H<sub>2</sub> MOBILITY 35 der im Rahmen der CEP gebauten bzw. geplanten Tankstellen. Die übrigen Tankstellen werden unabhängig von H<sub>2</sub> MOBILITY von anderen Unternehmen innerhalb der nach wie vor bestehenden CEP weiterbetrieben. Die CEP bleibt v. a. für den Betrieb von Tankstellen für Busse ein zentraler Akteur, da sich H<sub>2</sub> MOBILITY auf Tankstellen für Pkw konzentriert. Die von H<sub>2</sub> MOBILITY übernommenen Tankstellen müssen ständig verfügbar sein – eine Anforderung, die H<sub>2</sub> MOBILITY an die frühkommerzielle Infrastruktur stellt. Den Aufbau von 65 weiteren Tankstellen zur Erreichung des Ziels von 100 Tankstellen bis 2018/19 übernimmt H<sub>2</sub> MOBILITY in eigener Regie. Die Kosten sollen zur Hälfte von H<sub>2</sub> MOBILITY und zur Hälfte durch öffentliche Förderprogramme bestritten werden.<sup>94</sup> Wurde der Förderbedarf im Rahmen der CEP mit der Lösung technischer Fragen begründet, zielen die bislang von H<sub>2</sub> MOBILITY genutzten EU-Förderprogramme auf den Aufbau europaweiter Infrastruktur. Relevant dürften auch neue Fördermöglichkeiten im Rahmen des NIP sein: Erfolgreiche Antragsteller erhalten einen Zuschuss von bis zu 60 Prozent der Investitionskosten von Tankstellen, wobei auch Wasserelektrolyseure – jedoch nur bei ausschließlicher Nutzung von EE-Strom für die Wasserstoffproduktion – förderfähig sind.<sup>95</sup>

<sup>94</sup> Persönliche Mitteilungen Philipp Braunsdorf, NOW GmbH, und Sybille Riepe, H<sub>2</sub> MOBILITY, jeweils 08.09.2017

<sup>95</sup> [www.now-gmbh.de/de/aktuelles/presse/foerderung-weiterer-wasserstoff-tankstellen-im-nip](http://www.now-gmbh.de/de/aktuelles/presse/foerderung-weiterer-wasserstoff-tankstellen-im-nip)

<sup>96</sup> Bildquelle: Sybille Riepe, H<sub>2</sub> MOBILITY, 08.09.2017

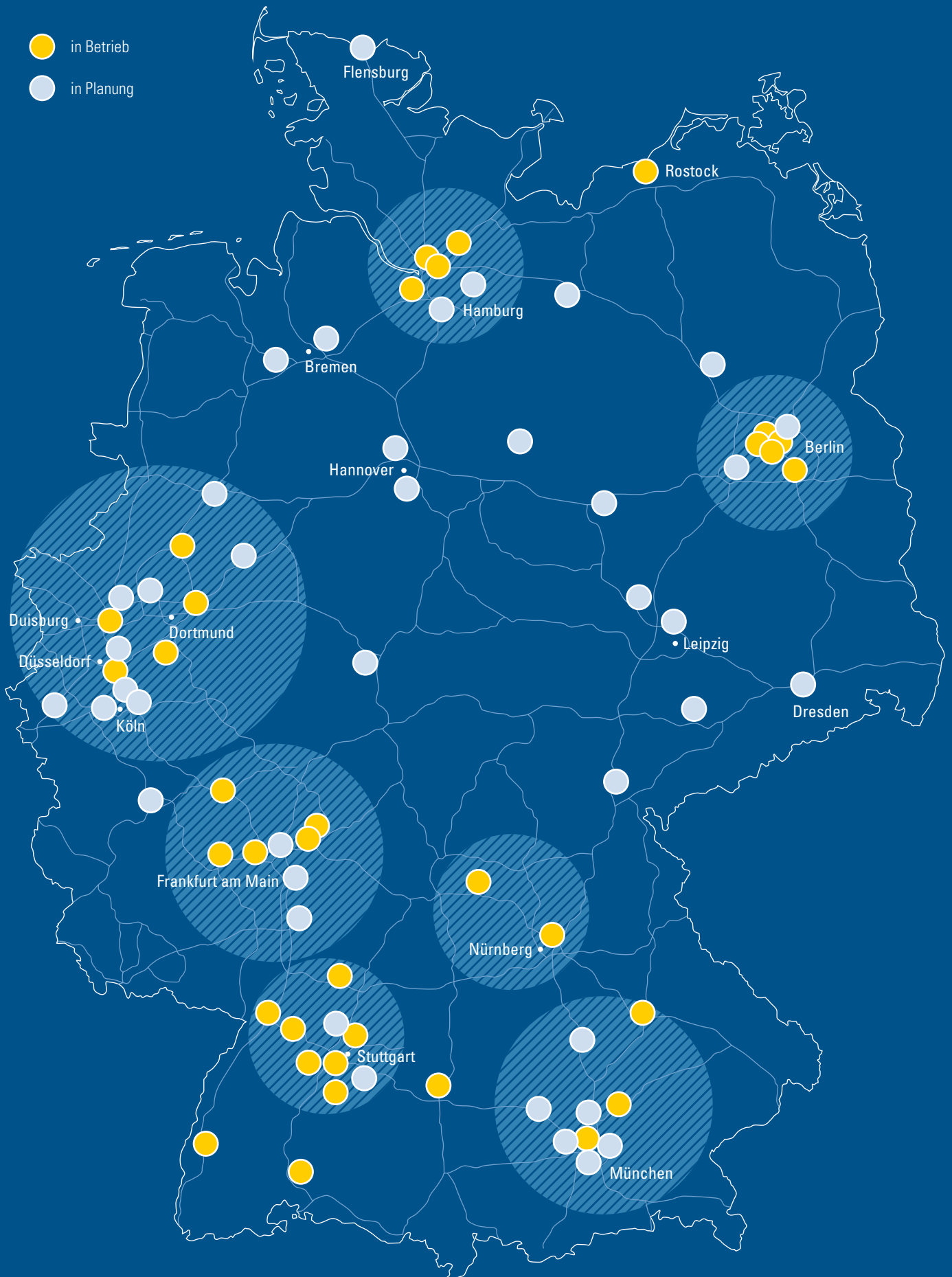
<sup>97</sup> Stolzenburg, K.: Brennstoffzellenbusse auf der Überholspur (Fußnote 54)

<sup>98</sup> [www.fch.europa.eu/sites/default/files/JIVE%20MEHRLIN%20Project%20Launch%20Press%20Release%20%2028ID%202895328%29\\_1.pdf](http://www.fch.europa.eu/sites/default/files/JIVE%20MEHRLIN%20Project%20Launch%20Press%20Release%20%2028ID%202895328%29_1.pdf)

Die Deutschlandkarte auf der nachfolgenden Seite zeigt eine Übersicht der von H<sub>2</sub> MOBILITY betriebenen und geplanten Tankstellen mit Stand September 2017.<sup>96</sup> Neben den in Betrieb bzw. Planung befindlichen öffentlichen Tankstellen von H<sub>2</sub> MOBILITY und CEP-Firmen existieren auch private Tankanlagen, z. B. von Automobilunternehmen. Dazu kommen einige in Demonstrationsprojekten sowie im Zuge der Marktaktivierung geförderte Tankstellen für Brennstoffzellenbusse. So wurden in dem oben skizzierten EU-Projekt CHIC nicht nur Fahrzeuge, sondern auch neun Wasserstofftankstellen erprobt.<sup>97</sup> JIVE wiederum wird vom Projekt MERHLIN flankiert, das die Errichtung sieben großer Tankanlagen für Busse finanziell unterstützt. Dazu kommen von nationalen Budgets, wie dem NIP, geförderte Tankstellen.<sup>98</sup> Die Karte stellt jedoch nur die H<sub>2</sub> MOBILITY-Anlagen dar. Einige wichtige internationale Aktivitäten zum Aufbau von Wasserstoffinfrastruktur werden unter den Fragen 26 bis 30 skizziert.

# H<sub>2</sub> MOBILITY-Tankstellen

-  in Betrieb
-  in Planung



## Frage 24: Wie hoch sind die Kosten des Aufbaus einer kommerziellen Wasserstoffinfrastruktur?

Neben der möglichst flächendeckenden Verfügbarkeit technologisch zuverlässiger Wasserstofftankstellen sind auch die Kosten für den Aufbau und Betrieb der Infrastruktur von entscheidender Bedeutung. Bislang wurden Tankstellen in Deutschland und weltweit vorwiegend im Rahmen von F&E- bzw. Demonstrationsprojekten aufgebaut und erprobt, wobei die technologische Optimierung im Vordergrund stand (Fragen 21 und 26 bis 30). Neben den Tankstellen selbst wurden auch Technologien zur Herstellung, Speicherung und zum Transport von Wasserstoff entwickelt und demonstriert, die ebenfalls der Wasserstoffinfrastruktur zuzurechnen sind. Stets spielte die Reduktion von Investitionskosten eine wesentliche Rolle und erhebliche Fortschritte wurden hierbei erzielt.

Beispielsweise sanken die durchschnittlichen Investitionskosten einer in der CEP eingesetzten Tankstelle von 2 Millionen € im Jahr 2008 um 50 Prozent auf 1 Million € im Jahr 2014, eine weitere Kostenminderung um 40 Prozent auf 600.000 € wird bis 2020 erwartet.<sup>99</sup> Die gerade anfänglich hohen Kosten waren v. a. durch die geringe technologische Reife und Einzelfertigung der Tankstellen je nach Demonstrationsziel bedingt, während zunehmend reife und standardisierte Anlagen später eine kostengünstigere Fertigung ermöglichten. Bedingt durch die geringe Anzahl von FCEVs war auch die Auslastung der Tankstellen unzulänglich und v. a. dadurch waren die Betriebskosten hoch. Mit der Zunahme eingesetzter FCEVs ist jedoch eine verbesserte Wirtschaftlichkeit des nach wie vor verlustbehafteten Tankstellenbetriebs zu erwarten. Abgesehen von Erfahrungswerten aus Demonstrationsprojekten liegen insgesamt nur wenige öffentliche und transparente Angaben zu Tankstellenkosten vor.

Zur Klärung der globalen Investitionskosten einer flächendeckenden Wasserstoffinfrastruktur in Deutschland wird derzeit eine von H<sub>2</sub> MOBILITY beauftragte Studie finalisiert.<sup>100</sup> Die Studie analysiert die Kosten für den Aufbau einer Infrastruktur für 20 Millionen FCEVs und vergleicht diese mit den Investitionskosten einer Stromversorgungsinfrastruktur für 20 Millionen BEVs. Wasserstoffseitig werden die Herstellung des Gases v. a. mittels Wasserelektrolyse, dessen Zwischenspeicherung in Kavernen, der Gastransport per Pipelines und Trailer sowie die Abgabe an Tankstellen untersucht. Bei der Ladeinfrastruktur für BEVs werden der erforderliche Ausbau von Stromnetzen und die Errichtung von Ladestationen berücksichtigt. Beide Infrastrukturen nutzen v. a. im Zuge der Energiewende aufkommende große Mengen EE und insbesondere Überschussstrom.

Wie die nachfolgende Grafik zeigt, sind bis zu einem Fahrzeugbestand von jeweils 100.000 FCEVs und BEVs die Wasserstoff- bzw. Ladeinfrastrukturkosten

<sup>99</sup> Bonhoff, K.: Marktvorbereitung und Kommerzialisierung der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie, in: EnergieAgentur.NRW (Hrsg.): Der 7. Deutsche Wasserstoff Congress 2016: Wasserstoff – Wegbereiter der Dekarbonisierung: Berlin, 05. und 06. Juli 2016: Vortragssammlung, Düsseldorf

<sup>100</sup> h2-mobility.de/wp-content/uploads/2017/10/EVS-Handout\_Studie\_2017-10-10.pdf



vergleichbar.<sup>101</sup> Bei einem weiteren Bestandszuwachs auf je 1 Million Fahrzeuge sind die Kosten der Wasserstoffinfrastruktur geringer, wobei bis hierhin weder die teure Elektrolyse noch Speicher zum Einsatz kommen. Im Bereich von 3 bis 10 Millionen Fahrzeugen übertreffen die Infrastrukturkosten für FCEVs die für BEVs deutlich, was v. a. auf den kostenintensiven Aufbau von Elektrolysekapazitäten und Speichern bei gleichzeitig geringer Auslastung der Tankstellen zurückzuführen ist. Jenseits von 10 Millionen Fahrzeugen profitiert die aufgebaute Wasserstoffinfrastruktur jedoch von guter Auslastung und wird zusehends kostengünstiger als die Ladeinfrastruktur. Ab einem Fahrzeugbestand von jeweils 20 Millionen FCEVs und BEVs betragen die kumulierten Kosten der Wasserstoffinfrastruktur 40 Milliarden € und damit 11 Milliarden € weniger als die für Ladeinfrastruktur aufzuwendenden 51 Milliarden €.

<sup>101</sup> Quelle: Forschungszentrum Jülich

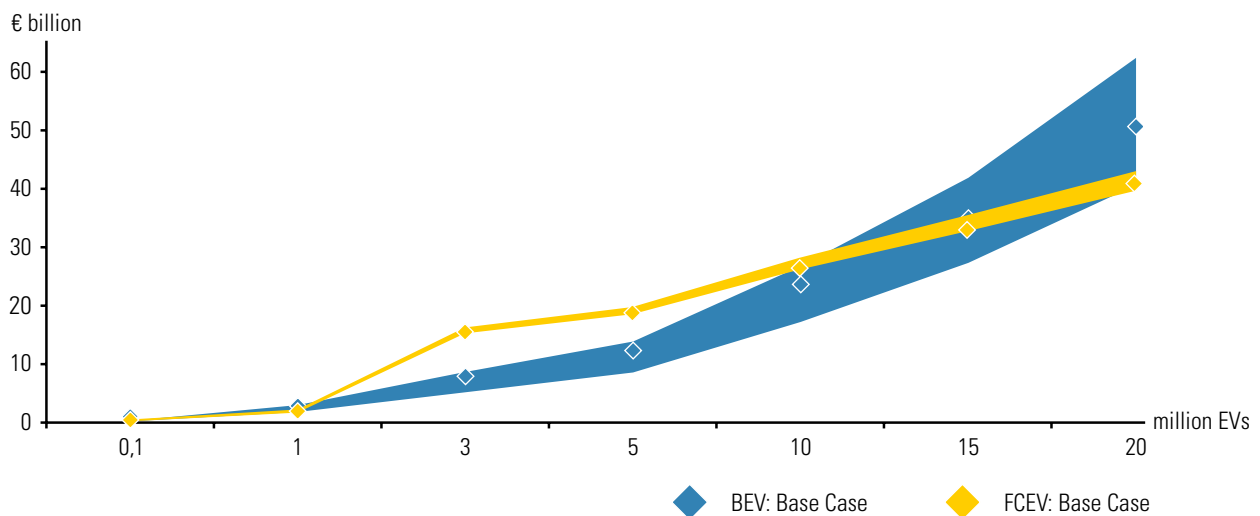
## Wasserstoff- bzw. Ladeinfrastrukturkosten



**Top** – larger batteries with 100 kWh dominate in the long run (base case + 100 kWh)  
**Bottom** – no fast charging at 350 kW in cities



**Top** – base case +20% investment in stations  
**Bottom** – base case -20% investment in stations



## 4. Wasserstoff und Brennstoffzellen im internationalen Vergleich

Der vierte Themenkomplex befasst sich mit der Entwicklung und Kommerzialisierung von Wasserstoff und Brennstoffzellen weltweit. Der Überblick schildert Aktivitäten in besonders engagierten Ländern und Regionen und verortet die wettbewerbliche Positionierung Deutschlands im internationalen Vergleich. Obgleich die Akteure jeweils Technologien für mobile wie auch stationäre Anwendungen befördern, beschränkt sich die Betrachtung auf den Verkehrsbereich.



## Frage 25: Wie und mit welchem Ergebnis werden Wasserstoff und Brennstoffzellen für den Verkehr in Deutschland gefördert?

Vor etwa zwei Jahrzehnten machten Daimler und andere Automobilunternehmen weltweit ihr Engagement für die Entwicklung von FCEVs publik. Andere Akteure verschiedener Wirtschaftsbranchen und Wissenschaftszweige nahmen gleichfalls F&E-Arbeiten zu vielfältigen Fragestellungen und Anwendungsoptionen von Wasserstoff und Brennstoffzellen auf. In Deutschland wurden die zunehmenden Aktivitäten von der Politik unterstützt und einer breiteren Öffentlichkeit bekannt. In dem 2006 verabschiedeten NIP stellte die Bundesregierung 700 Millionen € für Demonstrations- und F&E-Projekte bereit, die von der Industrie und anderen projektdurchführenden Parteien um weitere 700 Millionen € ergänzt wurden.<sup>102</sup> Das ursprüngliche NIP lief bis 2016 und trug wesentlich zur Technologieentwicklung und Kostensenkung bei. Angesichts eines weiter bestehenden Förderbedarfs wurde das Programm als NIP2 bis 2026 verlängert und mit zusätzlichen Fördermitteln versehen. Für den Zeitraum bis 2019 wurden bereits Fördermittel über 250 Millionen € zugesagt, die wiederum durch private Mittel zu ergänzen sind. Auch für NIP2 wird ein Gesamtbudget von 1,4 Milliarden € avisiert. Im Gegensatz zum Vorläuferprogramm kommt das Geld nicht nur F&E- und Demonstrationsprojekten, sondern auch Maßnahmen der Marktaktivierung zugute.<sup>103, 104</sup>

Mit der CEP beheimatet Deutschland einen der weltweit größten und am längsten bestehenden Zusammenschlüsse zur Erprobung und Weiterentwicklung von FCEVs und Wasserstoffinfrastruktur. H<sub>2</sub> MOBILITY nimmt als eine der weltweit ersten Initiativen für den flächendeckenden Aufbau frühkommerzieller Wasserstofftankstellen-Infrastruktur international eine Führungsrolle ein und setzt mit 100 Tankstellen bis 2018/19 und 400 Anlagen bis 2023 ambitionierte Ziele. Mit der offiziellen Vorstellung des Mercedes-Benz GLC F-CELL kündigte ein großes deutsches Automobilunternehmen die Kommerzialisierung eines FCEV an. Die im Rahmen des NIP angebotenen Zuschüsse für den Erwerb von FCEVs reduzieren die Mehrkosten gegenüber konventionellen Fahrzeugen erheblich. Der wachsende politische Druck auf den Einsatz von Diesel kann sich positiv auf die Nachfrage nach insbesondere als Dieselerersatz geeigneten FCEVs auswirken.

Hinsichtlich Technologieentwicklung und Kommerzialisierung von FCEVs sowie Wasserstoffinfrastruktur ist Deutschland damit prinzipiell gut aufgestellt. Allerdings wurde bereits deutlich, dass japanische und südkoreanische Firmen bei der Herstellung und dem Vertrieb von FCEVs die Führung übernommen haben. Wie die folgende

<sup>102</sup> Bildquelle: [h2-mobility.de/wp-content/uploads/2017/10/2017-10-10\\_Comparative-Analysis-of-Infrastructures.pdf](https://h2-mobility.de/wp-content/uploads/2017/10/2017-10-10_Comparative-Analysis-of-Infrastructures.pdf)

<sup>103</sup> [www.now-gmbh.de/de/nationales-innovationsprogramm/foerderprogramm](http://www.now-gmbh.de/de/nationales-innovationsprogramm/foerderprogramm)

<sup>104</sup> Geitmann, S.: BMVI gibt 250 Mio. Euro frei: Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, in: HZwei: Das Magazin für Wasserstoff und Brennstoffzellen, 17. Jahrgang, 2017, Heft 2, S. 32

<sup>105</sup> Auch Skandinavien gehört zu den bei der Kommerzialisierung von FCEVs und deren Infrastruktur führenden Regionen, wird hier aber nicht weiter diskutiert.

Diskussion zeigt, erwächst Deutschland starke Konkurrenz gerade in Asien und Kalifornien, was die eigentlich gute Ausgangslage relativiert.<sup>105</sup>

## Frage 26: Wie ist es um die Technologieförderung und wettbewerbliche Positionierung der EU bestellt?

Auch in einigen Mitgliedsstaaten der Europäischen Union werden Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien gerade im Verkehrsbereich an die Marktreife herangeführt. Auf EU-Ebene ist das 2008 gegründete und – nach Verlängerung der ursprünglichen Laufzeit – mit einem Mandat bis 2024 ausgestattete Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU) die wichtigste Institution. Mit einem Fördermittelbudget von mehr als 1 Milliarde € treibt FCH JU einschlägige technologische und marktliche Entwicklungen in Projekten voran. Beispielsweise werden im Vorhaben „Hydrogen Mobility Europe“ der Betrieb mehrerer Hundert Brennstoffzellen-Pkw und der Aufbau von etwa 30 Tankstellen in Deutschland, Skandinavien, Frankreich und dem Vereinigten Königreich unterstützt.<sup>106</sup> Die schon erwähnten Projekte JIVE und MEHRLIN fördern Brennstoffzellenbusse und Tankanlagen.<sup>107</sup> Andere EU-Institutionen tragen gleichfalls zur Kommerzialisierung von Fahrzeugen und Infrastruktur bei und ergänzen mit nationalen Budgets finanzierte Initiativen verschiedener europäischer Länder. Damit entwickelt sich die EU insgesamt zu einem international wichtigen Akteur der Technologieentwicklung und Kommerzialisierung von FCEVs und deren Infrastruktur. Allerdings sieht sich Europa ebenso wie Deutschland mit starken Wettbewerbern v. a. aus Asien konfrontiert.

<sup>106</sup> [www.fch.europa.eu](http://www.fch.europa.eu) und [www.fch.europa.eu/project/hydrogen-mobility-europe](http://www.fch.europa.eu/project/hydrogen-mobility-europe)

<sup>107</sup> [www.fch.europa.eu/sites/default/files/JIVE%20MEHRLIN%20Project%20Launch%20Press%20Release%20%28ID%202895328%29\\_1.pdf](http://www.fch.europa.eu/sites/default/files/JIVE%20MEHRLIN%20Project%20Launch%20Press%20Release%20%28ID%202895328%29_1.pdf)

## Frage 27: Wie bedeutsam sind Kalifornien und die USA als Markt für Brennstoffzellen und Wasserstoff?

Die Vereinigten Staaten von Amerika und insbesondere Kalifornien nehmen traditionell eine Führungsposition bei der Entwicklung und frühen Kommerzialisierung von FCEVs ein. Aufgrund erheblicher verkehrsbedingter Luftbelastungen verlangt die kalifornische Gesetzgebung seit Langem den Verkauf von Null-Emissions- bzw. Elektrofahrzeugen. Im Rahmen der California Fuel Cell Partnership (CaFCP) werden seit 1999 sowohl Brennstoffzellen-Pkw, -Busse und -Lkw wie auch Tankstellen verschiedener Hersteller und Generationen erprobt. Ein Großteil der weltweit kommerziell vertriebenen FCEVs gelangt nach Kalifornien und trug 2017 zu einem Bestand von etwa 2.200 FCEVs bei. Die FCEVs nutzen die etwa 30 derzeit verfügbaren Tankstellen der CaFCP entlang der kalifornischen Küste. Die CaFCP rechnet mit 13.500 FCEVs im Jahr 2019 und plant einen Ausbau des Tankstellennetzes auf etwa 60 Anlagen bis 2020.<sup>108</sup> Sowohl der Kauf von FCEVs wie der Aufbau der Infrastruktur werden staatlich unterstützt. Einige Staaten im Osten der USA verlangen gleich-

<sup>108</sup> Diese Angaben beruhen auf [cafcp.org/sites/default/files/July-2017-H2-Station-Network-Webinar-edited.pdf](http://cafcp.org/sites/default/files/July-2017-H2-Station-Network-Webinar-edited.pdf). Das California Air Resources Board rechnet erst 2020 mit einem Bestand von 13.400 FCEVs und das U. S. Department of Energy nennt deutlich niedrigere aktuelle Fahrzeugzahlen.

falls den Einsatz von Null-EmissionsFahrzeugen und betreiben bzw. planen den Bau von Tankstellen für FCEVs. Trotz der möglichen Kürzung von Förderbudgets durch den amtierenden Präsidenten bleibt die Position der USA bzw. Kaliforniens stark. Allerdings vertreiben amerikanische Automobilunternehmen bislang noch keine kommerziellen FCEVs.

## Frage 28: Was hat Japan als erfolgreicher Wettbewerber erreicht und wohin geht die Reise?

Mit Toyota und Honda verfügt Japan über zwei führende Hersteller kommerzieller FCEVs, die zusammen einen Großteil der weltweit verkauften Fahrzeuge liefern. Mit starker und kontinuierlicher politischer Unterstützung werden seit Langem die Entwicklung und Kommerzialisierung von FCEVs und deren Infrastruktur vorangetrieben. Aktuell sind in Japan mehr als 2.000 Brennstoffzellen-Pkw sowie über 90 teils mobile Tankstellen in Betrieb. Die Preise von FCEVs sollen bis 2025 auf das Niveau von Hybridfahrzeugen gesenkt und der Wasserstoffkraftstoffpreis noch zuvor deutlich reduziert werden. Auf dieser Basis sollen bis 2020 rund 40.000, bis 2025 dann 200.000 und bis 2030 schließlich 800.000 FCEVs auf Japans Straßen fahren. Für deren Kraftstoffversorgung sind 160 Tankstellen bis 2020 und 320 Anlagen bis 2025 vorgesehen. Die ambitionierten Planungen werden vom Staat durch großzügige Förderprogramme sowohl für den Bau und Betrieb der Infrastruktur wie auch die Anschaffung von Fahrzeugen unterstützt. Auch in der allgemeinen Energieversorgung soll Wasserstoff bis 2040 eine zentrale Rolle einnehmen. Denn bis dahin soll die auf höchster politischer Ebene formulierte Zielvorstellung einer wasserstoffbasierten Gesellschaft verwirklicht werden.<sup>109</sup> Zweifellos ist Japan damit zu den internationalen Vorreitern zu zählen.

## Frage 29: Etabliert sich Südkorea als ein führender Technologiestandort?

Südkorea tritt mit Hyundai als Anbieter preisgünstiger FCEVs erfolgreich in internationalen Märkten an und entwickelt zugleich den heimischen Markt. Aktuell sind in Südkorea etwa 500 FCEVs und 25 Tankstellen im Einsatz. Einer Roadmap der Regierung zufolge sollen bis 2020 ungefähr 10.000 und bis 2030 etwa 630.000 FCEVs fahren. Parallel soll die Anzahl der Tankstellen bis 2020 auf 100 und bis 2030 auf 520 wachsen. Die Beschaffung von Fahrzeugen und Infrastruktur wird stark subventioniert. Neben Pkw sind Busse von erheblicher strategischer Bedeutung: Insbesondere plant Südkorea, seine umfangreiche Flotte von Erdgasbussen nach und nach durch Brennstoffzellenbusse zu ersetzen.<sup>110</sup> Damit etabliert sich Südkorea als einer der wichtigsten Akteure im Bereich kommerzieller FCEVs und Betankungsinfrastruktur.

<sup>109</sup> Rose, R.: Aufbau einer H<sub>2</sub>-Wirtschaft: Japan bekennt sich zu Wasserstoff, in: HZwei: Das Magazin für Wasserstoff und Brennstoffzellen, 17. Jahrgang, 2017, Heft 2, S. 50–51, und Rose, R.: Die Trumpfkarte für Energiesicherheit: Japanischer Ministerpräsident Abe pusht Wasserstoff, in: HZwei: Das Magazin für Wasserstoff und Brennstoffzellen, 17. Jahrgang, 2017, Heft 3, S. 48–49

<sup>110</sup> [www.cte.tv/wp-content/uploads/2016/12/4\\_Jeon.pdf](http://www.cte.tv/wp-content/uploads/2016/12/4_Jeon.pdf)

## Frage 30: Entsteht mit China ein neues Schwergewicht für Wasserstoff und Brennstoffzellen?

Als Zukunftsmarkt und im Aufbau befindlicher Produktionsstandort für FCEVs und Wasserstoffinfrastruktur zieht China derzeit die größte Aufmerksamkeit auf sich. Angesichts schwerwiegender verkehrsbedingter Umweltprobleme verfolgt die Regierung des weltgrößten Automobilmarkts die Strategie, Antriebe zu elektrifizieren. Der 2016 verabschiedete 13. Fünfjahresplan zielt auf erhebliches Wirtschaftswachstum auf der Grundlage innovativer Industrieproduktion und identifiziert batterie- und brennstoffzellenbasierte Elektromobilität als ein strategisch zentrales Wachstumsfeld. Im November 2016 gab die Regierung die Zielsetzung bekannt, einen Bestand von 50.000 FCEVs bis 2025 und mindestens 1 Million FCEVs bis 2030 zu erreichen. Dafür sollen bis 2025 etwa 300 und bis 2030 etwa 1.000 Wasserstofftankstellen in Betrieb genommen werden. Für die Erreichung dieser Ziele stellt die Regierung attraktive Subventionen bereit.<sup>111</sup>

<sup>111</sup> [www.fuelcellcars.com/hydrogen-fuel-cell-car-development-intensifies-in-china](http://www.fuelcellcars.com/hydrogen-fuel-cell-car-development-intensifies-in-china) und [businesskorea.co.kr/english/news/industry/16601-hydrogen-car-competition-korea-japan-lead-global-fcev-market-two-frontrunners](http://businesskorea.co.kr/english/news/industry/16601-hydrogen-car-competition-korea-japan-lead-global-fcev-market-two-frontrunners)

<sup>112</sup> Jösting, S.: Asien gibt den Takt vor: Aktienanalyse von Sven Jösting, in: HZwei: Das Magazin für Wasserstoff und Brennstoffzellen, 17. Jahrgang, 2017, Heft 2, S. 34–37, und Lehner, S. und Hart, D.: BZ-Markt: Transportbereich wächst rasant (Fußnote 5)

<sup>113</sup> [www.ballard.com/about-ballard/newsroom/news-releases/2017/09/06/ceremonial-opening-of-ballard-s-china-stack-joint-venture-production-facility](http://www.ballard.com/about-ballard/newsroom/news-releases/2017/09/06/ceremonial-opening-of-ballard-s-china-stack-joint-venture-production-facility)

Die chinesische Industrie reagiert einerseits mit dem massiven Aufbau eigener Technologie- und Fertigungskompetenzen und andererseits durch verstärkte Kooperationen mit ausländischen Partnern. Gemäß der Devise „Made in China 2025“ werden attraktive und großvolumige Aufträge an internationale Technologieführer oftmals an eine Produktion in China geknüpft.<sup>112</sup> So eröffnete z. B. der kanadische Brennstoffzellenhersteller Ballard Power Systems in einem Joint Venture mit der chinesischen Guangdong Nation Synergy Hydrogen Power Technology unlängst eine Produktionsanlage für Brennstoffzellen-Stacks. Noch 2017 soll die Herstellung von 6.000 Stacks jährlich für Brennstoffzellenbusse und andere Nutzfahrzeuge beginnen und später auf 20.000 Stacks pro Jahr ausgeweitet werden.<sup>113</sup> Andere ausländische Technologieführer engagieren sich ebenfalls in China als Lieferanten und Partner einheimischer Firmen.

Offenkundig entwickelt sich China zu einem Schwergewicht unter den international führenden Anwendern und Herstellern von Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien. Als einer der wichtigsten Absatzmärkte auch für deutsche Automobilunternehmen setzt China Maßstäbe hinsichtlich technologischer Anforderungen und verlangt zukünftig auch von Importeuren die Einhaltung gesetzlicher Mindestquoten für den Verkauf von Elektrofahrzeugen. Die deutsche Automobilindustrie wird sich angebotsseitig starken chinesischen Wettbewerbern und marktseitig einer klar definierten Nachfrage nach FCEVs stellen müssen. Angesichts dieser Herausforderungen erscheint ein verstärktes Engagement bei der Kommerzialisierung von FCEVs ratsam.

## Frage 31: Wie ist Deutschland im internationalen Vergleich aufgestellt?

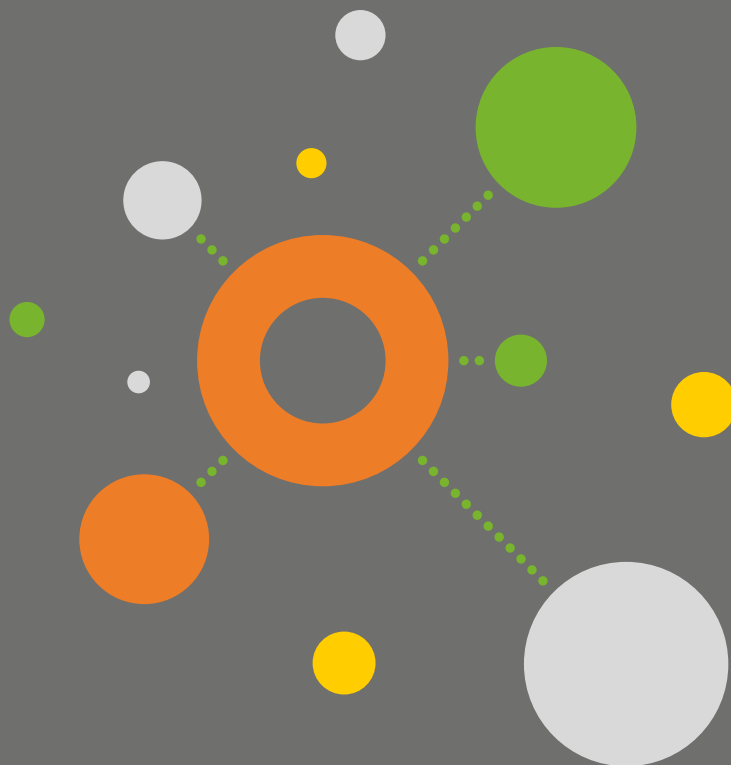
Hinsichtlich Technologieentwicklung und Kommerzialisierung von FCEVs sowie Wasserstoffinfrastruktur verfügt Deutschland über eine grundsätzlich gute Ausgangsposition für den internationalen Wettbewerb. Die Industrie engagiert sich in Form umfangreicher F&E- und Demonstrationsaktivitäten. Ein Hersteller kündigt die Serienproduktion eines FCEV an und treibt, zusammen mit anderen Unternehmen, den Aufbau einer kommerziellen Tankstelleninfrastruktur voran. Auch die Inbetriebnahme einer signifikanten Zahl von Bussen hat begonnen. Die Bundesregierung unterstützt die Marktvorbereitung und -aktivierung mit großzügigen Fördermitteln. Zudem entwickeln bzw. vertreiben zahlreiche Unternehmen hochwertige Technologiekomponenten wie z. B. Brennstoffzellen oder Wasserelektrolyseure, die in diesem Kompendium nicht gesondert betrachtet werden.

Dennoch ist offensichtlich, dass die Kommerzialisierung von FCEVs und deren Infrastruktur in anderen Ländern dynamischer verläuft. Alle bislang am Markt erhältlichen FCEVs kommen aus Asien und die dortigen Zielsetzungen hinsichtlich der weiteren Marktentwicklung sind ebenso klar formuliert wie ambitioniert. Die deutsche Industrie hat z. B. der von Toyota ab 2020 geplanten jährlichen Produktion von 30.000 FCEVs wenig entgegenzusetzen (Frage 10) und politische Ziele wie die von Japan bis 2025 angestrebte FCEV-Flottengröße von 200.000 gibt es in Deutschland nicht. Zudem werden die allermeisten FCEVs in Asien und den USA betrieben, als Marktplatz hinkt Europa weit hinterher. Infrastrukturseitig ist Deutschland besser positioniert und gehört mit den im Aufbau befindlichen 100 H<sub>2</sub> MOBILITY-Tankstellen zu den international führenden Ländern. Die längerfristigen Zielsetzungen für den Infrastrukturausbau sind allerdings verglichen mit den japanischen, südkoreanischen und chinesischen Planungen weniger ambitioniert. Bedenklich erscheint die Entwicklung bei Brennstoffzellenbussen: Aktuell werden in China Produktionskapazitäten aufgebaut, die die gesamte in Europa entstehende Busnachfrage mehrfach decken könnten. Deutsche Anbieter von Brennstoffzellenbussen gibt es hingegen derzeit nicht. Bedeutsam ist auch die Beobachtung, dass Asien und Nordamerika zusammen etwa 95 Prozent der weltweit vertriebenen Brennstoffzellenleistung absorbieren.<sup>114</sup> Daher wird sich Deutschland verstärkt engagieren müssen, um bei der Kommerzialisierung von FCEVs und deren Infrastruktur den Führungsanspruch einer Autonation zu erhalten.

<sup>114</sup> Lehner, S. und Hart, D.: BZ-Markt: Transportbereich wächst rasant (Fußnote 5)

## 5. Sektorenübergreifender Einsatz von Wasserstoff

Im fünften Themenkomplex wird die Diskussion des Begriffs der Sektorenkopplung wieder aufgenommen. Wie schon im ersten Themenkomplex geschildert, kann Wasserstoff sowohl mobil wie auch stationär eingesetzt werden und bietet sich als Medium zur Verbindung verschiedener Wirtschaftssektoren an. Im Folgenden werden Prinzip, Anwendungsoptionen und zu erwartende Vorteile der Sektorenkopplung näher erläutert.





## Frage 32: Was versteht man unter Sektorenkopplung und welchen Beitrag kann Wasserstoff dazu leisten?

Wie unter Frage 7 ausgeführt, gehen mit dem Ausbau von EE im Zuge der Energiewende die Chance und Notwendigkeit einher, EE in alle Wirtschaftssektoren v. a. in Form von Strom und Wärme einzubringen. Bisher war die Energieversorgung von Verkehr, Industrie und Haushalten weitgehend voneinander getrennt und durch die Dominanz von Kohle im stationären Bereich und von Erdöl im Verkehrsbereich geprägt. Allerdings trugen EE im Jahr 2016 bereits 32 Prozent zur Stromversorgung und 15 Prozent zur Deckung der gesamten Endenergienachfrage Deutschlands bei.<sup>115</sup> Gemäß den Zielsetzungen der Energiewende soll der EE-Anteil an der Stromversorgung auf gut 80 Prozent und am Endenergieverbrauch auf 60 Prozent bis 2050 steigen.<sup>116</sup> Als Folge werden EE fossile Energien in allen Sektoren weitgehend ersetzen und die Energieversorgung dominieren. Zugleich erodiert die Trennung zwischen den Sektoren und entsteht die Möglichkeit der Sektorenkopplung.

Eine wesentliche Voraussetzung für die Verwirklichung einer primär EE-basierten Wirtschaft ist die Integration von EE in bestehende und sich nur allmählich wandelnde Strukturen. Stark wachsende Anteile unregelmäßig auftretenden Wind- und Solarstroms müssen für den nachfragegerechten Abruf verstetigt werden. Durch Wandlung von EE-Strom in Wasserstoff per Elektrolyse und die für alle Anwendungen erforderliche Speicherung kann ebenjene Verstetigung erreicht werden. Bei der Bereitstellung von Wasserstoff für die Nutzung in verschiedenen Sektoren können zahlreiche Infrastrukturkomponenten von den unterschiedlichen Beteiligten gemeinschaftlich genutzt werden. Dies gilt z. B. für große und daher kostengünstige Elektrolyseanlagen oder für Trailer und Pipelines für den Wasserstofftransport. Aufgrund von Skaleneffekten und höherer Anlagenauslastung kann die Wirtschaftlichkeit deutlich verbessert werden.

Wasserstoff ist insbesondere für die längerfristige Speicherung großer Energiemengen attraktiv. Die Speicherung von reinem Wasserstoff in Salzkavernen gilt hinsichtlich Speicherkapazität und Kosten als eine anderen Technologien klar überlegene Option.<sup>117</sup> Bereits heute übersteigen die Mengen an Wind- und Solarstrom die Aufnahmekapazität der Netze erheblich, sodass Erzeugungsanlagen immer häufiger abgeschaltet werden. Im Zuge des weiteren Ausbaus der EE werden Energiespeicher sehr großer Kapazität zur Überbrückung saisonaler Schwankungen im Aufkommen von EE erforderlich sein. Auch weil sie parallel andere Anwendungen versorgen können, bieten Wasserstoffspeicher eine sehr gute Lösungsoption für eine zentrale Herausforderung der Energiewende.

<sup>115</sup> [www.umweltbundesamt.de/indikator-erneuerbare-energien#textpart-1](http://www.umweltbundesamt.de/indikator-erneuerbare-energien#textpart-1)

<sup>116</sup> [www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Themen/Energiewende/Fragen-Antworten/1\\_Allgemeines/1\\_warum/\\_node.html](http://www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Themen/Energiewende/Fragen-Antworten/1_Allgemeines/1_warum/_node.html)

<sup>117</sup> [www.fch.europa.eu/sites/default/files/CommercializationofEnergyStorageFinal\\_3.pdf](http://www.fch.europa.eu/sites/default/files/CommercializationofEnergyStorageFinal_3.pdf), Auch das Speichervermögen des Erdgasnetzes ist sehr groß und Wasserstoff kann mittels Beimischung oder Methanisierung, also der Umwandlung von Wasserstoff und Kohlendioxid zu Methan, in das Netz eingebracht werden. Eine Verwendung für FCEVs oder auf reinen Wasserstoff angewiesene stationäre Anwendungen ist dann aber nicht möglich.

## Frage 33: Wie könnte eine Sektorenkopplung mittels Wasserstoff und Brennstoffzellen konkret aussehen?

Im Rahmen der Sektorenkopplung sind Wasserstoff und Brennstoffzellen vielfältig einsetzbar. Die nachfolgende Abbildung illustriert wichtige Herstellungs- und Nutzungspfade und konzentriert sich dabei auf reinen Wasserstoff.<sup>118</sup> Andere Ansätze der Sektorenkopplung unter Einbeziehung des Erdgasnetzes werden jedoch ebenfalls verfolgt (Frage 7).

<sup>118</sup> Bildquelle:  
cleanenergypartnership.de/  
fileadmin/Newsletter/user\_  
upload/171020\_594x841\_NOW\_  
Infografik\_Wasserstoff\_D.pdf

Gemäß der Abbildung wird EE entweder direkt ins Stromnetz eingespeist oder per Wasserelektrolyse in Wasserstoff gewandelt. Der Wasserstoff wird dann gespeichert und bedarfsgerecht an die verschiedenen Anwendungssektoren abgegeben. Nach Rückverstromung des Wasserstoffs z. B. in einer Brennstoffzelle kann der Strom der stationären Stromversorgung zugeführt werden. Der Vorteil liegt darin, dass dadurch die für den Ausgleich von Fluktuationen wichtige Energiespeicherung erbracht wird, die energetischen Verluste sind allerdings hoch. In der Industrie ist EE-Wasserstoff primär als Produktionsmittel relevant und kann fossilen Wasserstoff ersetzen. So kann z. B. die Klimabilanz herkömmlicher Raffinerien erheblich verbessert werden. Durch Umsetzung des Wasserstoffs z. B. in KWK-Brennstoffzellenanlagen für den Hausgebrauch kann neben Strom auch Wärme bereitgestellt werden. Hier kommen sowohl die Nutzung von EE wie auch die sehr hohe Anlageneffizienz der Energiewende zugute. Schließlich kann der Wasserstoff dem Verkehr

### ii. Wasserstoff- bzw. Ladeinfrastrukturkosten



zugeführt und für FCEVs aller Art verwendet werden. Auch hier liegen die Vorteile im Ersatz fossiler Energien durch EE und hoher Effizienz.

Alle Anwendungen profitieren von aus der Sektorenkopplung erwachsenden Synergieeffekten und damit verbundenen geringeren Kosten. Entscheidend für die Verwendung des Wasserstoffs ist dabei letztendlich die Wirtschaftlichkeit des jeweiligen Einsatzfeldes. Die Nutzung als Kraftstoff gilt aufgrund der hohen Zahlungsbereitschaft dieses Marktes generell als besonders attraktiv. Daher könnte sich der Verkehrssektor als Leitmarkt erweisen und dem breiten Einsatz von Wasserstoff auch in anderen Bereichen den Weg ebnen.

## Frage 34: Welche Synergieeffekte können durch die Sektorenkopplung mit Wasserstoff erschlossen werden?

Die Wasserstoffproduktion auf Basis von EE hat in den letzten Jahren erheblich an Bedeutung gewonnen. So steigt die Nachfrage seitens der Automobil- und Kraftstoffbranche, die EE-Wasserstoff primär als Kraftstoff für FCEVs betrachtet. Aber auch die Erdgasindustrie hat sich als wichtiger Akteur etabliert und erforscht den Ersatz fossilen Erdgases durch EE-Wasserstoff.<sup>119</sup> Dabei steht die Einspeisung von Wasserstoff ins Erdgasnetz im Vordergrund.<sup>120</sup> Die chemische Industrie und andere Branchen interessieren sich ebenfalls für EE-Wasserstoff. Allerdings verfolgen die jeweiligen Akteure unterschiedliche technologische und wirtschaftliche Strategien, über deren Zusammenwirken im Hinblick auf mögliche gemeinschaftliche Verwertungsperspektiven und Synergien noch wenig bekannt ist.

Zur Klärung des Sachverhalts erforscht die Metastudie zur Untersuchung der Potenziale von Wasserstoff für die Integration von Verkehrs- und Energiewirtschaft die parallele Nutzung von Wasserstoff als Kraftstoff und als Zumischgas zu Erdgas sowie den Einsatz von EE-Wasserstoff als Industriegas.<sup>121</sup> Sie legt zwei bedeutsame Studien zugrunde: zum einen eine Untersuchung großmaßstäblicher Wind-Wasserstoff-Systeme, die als eine der ersten sektorenübergreifenden Studien sowohl den Verkauf von Wasserstoff als Kraftstoff wie auch als Strom für stationäre Anwendungen erforschte.<sup>122</sup> Zum anderen eine Studie zur Wasserstoffeinspeisung in das Erdgasnetz und zur anschließenden Nutzung als Brennstoff für den stationären Bereich.<sup>123</sup> Die Metastudie führt die wichtigsten technologie- und marktbezogenen Ergebnisse zusammen und integriert diese in verschiedene Wertschöpfungsketten bzw. Herstellungs- und Absatzpfade erneuerbaren Wasserstoffs. Erstmals werden durch die Kombination verschiedener Anwendungen entstehende Synergiepotenziale quantifiziert.

<sup>119</sup> Wesentliche Akteure haben sich in der Strategieplattform „Power to Gas“ der Deutschen Energie-Agentur und in der DWV-Fachkommission „performing energy“ zusammengeschlossen. Deren Websites [www.dena.de/themenprojekte/projekte/energiesysteme/strategieplattform-power-to-gas](http://www.dena.de/themenprojekte/projekte/energiesysteme/strategieplattform-power-to-gas) und [www.dwv-info.de/performing-energy](http://www.dwv-info.de/performing-energy) bieten weiterführende Informationen.

<sup>120</sup> Auch die Methanisierung und die Umwidmung von Erdgas- zu Wasserstoffnetzen werden untersucht.

<sup>121</sup> [www.dvgw.de/medien/dvgw/leistungen/forschung/berichte/g201415.pdf](http://www.dvgw.de/medien/dvgw/leistungen/forschung/berichte/g201415.pdf)

<sup>122</sup> [www.now-gmbh.de/content/7-service/4-publikationen/4-nip-wasserstoff-und-brennstoffzellentechnologie/abschlussbericht\\_integration\\_von\\_wind-wasserstoff-systemen\\_in\\_das\\_energiesystem.pdf](http://www.now-gmbh.de/content/7-service/4-publikationen/4-nip-wasserstoff-und-brennstoffzellentechnologie/abschlussbericht_integration_von_wind-wasserstoff-systemen_in_das_energiesystem.pdf)

<sup>123</sup> [www.dvgw.de/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=2141&token=e94b05a2574ded00b333065b98b7e4cd6ef73229](http://www.dvgw.de/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=2141&token=e94b05a2574ded00b333065b98b7e4cd6ef73229)

Zunächst werden sogenannte Einzelmodelle entwickelt, die anhand einer Gegenüberstellung von Gestehungskosten und abnahmeseitiger Zahlungsbereitschaft die Wettbewerbsfähigkeit von erneuerbar vs. fossil erzeugtem Wasserstoff ermitteln. In keinem der drei Einzelmodelle Mobilität, Industrie und Gasnetz kann sich EE-Wasserstoff gegenüber der fossilen Konkurrenz behaupten. Demgegenüber liegt nahe, dass eine kombinierte Verwendung von Anlagen für mehrere Absatzpfade eine Skalierung und bessere Auslastung ermöglicht. Beispielsweise können die elektrische Leistung und Auslastung von Wasserelektrolyseuren deutlich erhöht und dadurch Kosten reduziert werden. Auch entsteht durch die Zusammenführung mehrerer Märkte eine stärkere Nachfrage nach Wasserstoff, was wiederum den Einsatz größerer Anlagen begünstigt.

Daher werden sogenannte Kombinationsmodelle erstellt, die jeweils ein zentrales zugrunde liegendes Einzelmodell um Elemente der anderen Einzelmodelle ergänzen. Beispielsweise stellt das Kombinationsmodell Mobilität hauptsächlich Wasserstoff für FCEVs zur Verfügung, sieht aber auch die Lieferung von Wasserstoff zur Einspeisung ins Erdgasnetz vor. In jedem Fall sinken die Wasserstoffgestehungskosten gegenüber dem Einzelmodell erheblich. Im Kombinationsmodell Mobilität fallen die Kosten von 11,65 €/kg H<sub>2</sub> auf 8,05 €/kg H<sub>2</sub> und nähern sich der als wettbewerbsfähig geltenden Schwelle von 5,96 €/kg H<sub>2</sub>. Auch die Wettbewerbsfähigkeit der Kombinationsmodelle Industrie und Gasnetz gegenüber fossilem Wasserstoff verbessert sich deutlich. In einem weiteren Schritt wird die Wirkung einer erhöhten Auslastung der Elektrolyse ermittelt und zusätzliche Kostensenkungspotenziale werden festgestellt: EE-Wasserstoff für die Mobilität kann für 4,79 €/kg H<sub>2</sub> bereitgestellt werden und erreicht bzw. unterschreitet damit die von der fossilen Konkurrenz vorgegebenen Kosten. Während in den anderen beiden Kombinationsmodellen die Kostenvorgaben nicht erreicht werden, erfolgt doch insbesondere im Industriebereich eine deutliche Annäherung.<sup>124</sup> Damit werden auch die wirtschaftlichen Vorteile der Sektorenkopplung durch Wasserstoff nachgewiesen.

<sup>124</sup> Ehret, O., Müller-Syring, G., Henel, M., Wehling, A. und Weiße, M.: Wirtschaftlichkeit nachgewiesen: Metastudie zu Potenzialen von Wasserstoff, in: HZwei: Das Magazin für Wasserstoff und Brennstoffzellen, 16. Jahrgang, 2016, Heft 4, S. 18–19

## Frage 35: Welche Projekte zur sektorenübergreifenden Wasserstoffnutzung gibt es in Deutschland?

Zahlreiche Akteure verschiedener Branchen haben das Potenzial erneuerbaren Wasserstoffs für die Bereitstellung von Strom und Wärme für Verkehr, Industrie und Haushalte erkannt. Der Grundgedanke aller Anwendungen ist der Ersatz fossiler Energie durch EE-Wasserstoff, die Nutzungspfade unterscheiden sich jedoch erheblich. Daher wurde der Begriff „Power-to-X“ (PtX) geprägt, der die Vielfalt der Anwendungen über den gemeinsamen Nenner EE-Wasserstoff zusammenfasst. Die umseitige Karte zeigt aktuelle PtX-Projekte in Deutschland.<sup>125</sup>

<sup>125</sup> Bildquelle: Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, 2017

# Power-to-Hydrogen in Betrieb



# 6. Zusammenfassung



Der Technologieüberblick Wasserstoff und Brennstoffzellen zeigt, dass Wasserstoff und Brennstoffzellen an breiter Front kommerzialisiert werden: Brennstoffzellenbetriebene Pkw und Busse gelangen weltweit in den Straßenverkehr. Brennstoffzellen-Gabelstapler werden bereits in größerer Stückzahl kommerziell genutzt: Rund 19.000 Flurförderzeuge sind in den USA und anderen Ländern im Einsatz. Auch der Schienenbereich ist ein technisch und wirtschaftlich attraktives Anwendungsfeld: 14 Brennstoffzellen-Triebzüge nehmen den regulären Bahnbetrieb in Niedersachsen auf. Im stationären Bereich versorgen weit über 200.000 Brennstoffzellenanlagen Haushalte v. a. in Japan mit Strom und Wärme. Dank seiner Eignung für mobilen wie auch stationären Einsatz ist Wasserstoff auch zunehmend als Medium für die Kopplung verschiedener Wirtschaftssektoren von Interesse.

Die Detailbetrachtung des Einsatzes von Brennstoffzellen im Straßenverkehr bestätigt die wachsende Dynamik der frühen Kommerzialisierung von FCEVs: Asiatische Automobilunternehmen bieten weltweit Brennstoffzellen-Pkw zum Kauf oder Leasing an. Hyundai veräußerte bislang an die 1.000 FCEVs und kündigte für 2018 weitere 3.600 Exemplare eines preisgünstigen Fahrzeugs neuer Generation an. Toyota setzte bis Anfang 2017 bereits 3.000 FCEVs ab und plant für 2020 die Markteinführung eines neuen Modells mit einem jährlichen Produktionsvolumen von 30.000 Exemplaren. Honda tritt gleichfalls als Anbieter kommerzieller FCEVs auf und kündigte ein neues Fahrzeug und verstärktes Engagement für die frühen 2020er an. Daimler präsentierte das Vorserienmodell eines FCEV und bereitet sich, nach eigenen Angaben, auf eine 2018 beginnende Serienfertigung vor. Brennstoffzellenbusse werden von verschiedenen Herstellern gefertigt und mehrere Hundert Exemplare werden 2020 allein in Europa fahren. Perspektivisch wichtige Brennstoffzellen-Lkw werden entwickelt. Kommerziell verfügbare FCEVs aller Bauarten sind technisch reif und bieten erhebliche ökologische Vorteile. Angesichts hoher Reichweiten und Eignung für schwere Fahrzeuge sind FCEVs ein möglicher Dieseltersatz. Hohe Kosten und mangelnde Betankungsinfrastruktur stehen einer breiten Markteinführung aber bislang entgegen. Mithilfe staatlicher Förderungen könnten FCEVs in Deutschland jedoch zeitnah ab 40.000 € Endkosten für den Verbraucher erhältlich sein.

Ein wesentlicher Erfolgsfaktor für die Kommerzialisierung von FCEVs ist auch die Verfügbarkeit von Wasserstoff und Infrastruktur für den Straßenverkehr. Wasserstoff kann mit einer Vielzahl von Verfahren auf Basis fossiler Energien wie auch EE produziert werden. Besonders wichtig sind die Wasserelektrolyse mit EE-Strom und die Dampfreformierung von Erd- oder Biogas. Beide Verfahren sind kommerziell verfügbar und ermöglichen die Produktion kohlenstofffreien bzw. -armen Wasserstoffs in großen und für die Deckung der Kraftstoffnachfrage ausreichenden Mengen. Angesichts der Verfehlung umweltpolitischer Ziele der Energiewende im Verkehrsbereich sind die Klimaschutzpotenziale von EE-Wasserstoff von besonderer Bedeutung: Einer Roadmap der IEA zufolge kann durch den Einsatz von weltweit 113 Millionen

FCEVs der vom Verkehrssektor geforderte Beitrag zur Begrenzung der Erderwärmung auf 2 °C bis 2050 erbracht werden. Für den Aufbau der notwendigen Betankungsinfrastruktur in Deutschland war anfänglich die CEP und ist heute die Industrieinitiative H<sub>2</sub> MOBILITY zuständig. Die Zahl der Tankstellen soll von 43 Ende 2017 auf 100 in den Jahren 2018/19 und auf 400 bis 2023 steigen, wenngleich letzteres Ziel von der Zahl der dann eingesetzten FCEVs abhängig gemacht wird. Die Kosten einer Wasserstoffinfrastruktur für 20 Millionen FCEVs betragen einer Studie zufolge 40 Milliarden € und wären 11 Milliarden € niedriger als die einer vergleichbaren Ladeinfrastruktur für BEVs.

Angesichts der strategischen Bedeutung der aufgezeigten Entwicklungen ist eine Verortung der Wettbewerbsposition Deutschlands hinsichtlich Wasserstoff und Brennstoffzellen im internationalen Vergleich wichtig. Aufgrund der Technologieförderung durch das NIP, der Planungen zur Serienfertigung eines FCEV und des ambitionierten Ausbaus der Tankstelleninfrastruktur ist Deutschland eigentlich gut aufgestellt. Allerdings verläuft die Kommerzialisierung von FCEVs und deren Infrastruktur in Asien und den USA insgesamt dynamischer: Japanische und Südkoreanische Firmen sind die einzigen Anbieter am Markt erhältlicher FCEVs und verfolgen ambitionierte Absatzpläne; zudem beheimaten Asien und die USA die mit Abstand größten FCEV-Flotten. Demgegenüber zählt Deutschland infrastrukturseitig mit H<sub>2</sub> MOBILITY zu den international führenden Ländern. Bedenklich erscheint allerdings der wachsende Vorsprung Chinas bei der Kommerzialisierung von Brennstoffzellenbussen. Der Weltmarkt für Brennstoffzellen wird überdies klar von Asien und Nordamerika dominiert: Gemessen an der Leistung werden nur 5 Prozent aller Brennstoffzellen in Europa und anderen Regionen ausgeliefert. Angesichts dessen wird sich Deutschland stärker engagieren müssen, um bei der Kommerzialisierung von FCEVs und deren Infrastruktur den Führungsanspruch einer Autonation zu erhalten.

Ein sektorenübergreifender Einsatz von Wasserstoff ermöglicht die Einbindung wachsender Mengen EE in bestehende Strukturen. Durch die Wandlung in Wasserstoff wird fluktuierender EE-Strom verstetigt und für die nachfragegerechte Nutzung gespeichert. Brennstoffzellen liefern effizient Strom und Wärme für Verkehr, Industrie und Haushalte. Die bisher getrennte Energieversorgung verschiedener Wirtschaftssektoren wächst zusammen und Kostensenkungen durch Synergieeffekte werden möglich. Dadurch wird die Energiewende unterstützt und die Kommerzialisierung von Wasserstoff und Brennstoffzellen im Verkehr und anderen Wirtschaftsbereichen befördert.



**ABKÜRZUNGEN**

BEV	Batteriefahrzeug	Battery Electric Vehicle
CaFCP	–	California Fuel Cell Partnership
CEP	–	Clean Energy Partnership
CHIC	–	Clean Hydrogen In European Cities
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt	
DWV	Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband	–
EE	Erneuerbare Energie(n)	–
EE-Wasserstoff	Mittels EE hergestellter Wasserstoff	–
FCEV	Brennstoffzellenfahrzeug	Fuel Cell Electric Vehicle
FCH JU	–	Fuel Cells and Hydro Joint Undertaking
F&E	Forschung und Entwicklung	–
H <sub>2</sub>	Wasserstoff (Molekül)	Hydrogen (molecule)
IEA	Internationale Energieagentur	–
JIVE	–	Joint Initiative for hydrogen Vehicles across Europe
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung	–
NIP	Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie	–
NOW	Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie	–
PEMEL	Polymer-Elektrolyt-Elektrolyse	Proton Exchange Membrane Electrolysis
PEMFC	Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzelle	Proton Exchange Membrane Fuel Cell
PtX	–	Power-to-X
SOFC	Oxidkeramische Brennstoffzelle	Solid Oxide Fuel Cell
SUV		Sports Utility Vehicle
TREMOD		Transport Emission Model

**IMPRESSUM**

NOW GmbH  
Nationale Organisation Wasserstoff-  
und Brennstoffzellentechnologie  
Fasanenstraße 5  
10623 Berlin

+49(0)30-311 61 16-00  
kontakt@now-gmbh.de

**AUTORENKONTAKT:**

Dr. Oliver Ehret  
Center of Automotive Management (CAM)  
An der Gohrsmühle 25  
51465 Bergisch Gladbach  
+49(0)2202-285 77-0  
oliver.ehret@auto-institut.de

**STAND:**

März 2018



