Brennstoffzellen

Fahrplan 2020

Bericht

RECHTLICHER HINWEIS: Übersetzungen von Materialien in andere Sprachen als Englisch sind lediglich als Hilfestellung für Personen gedacht, die der englischen Sprache nicht mächtig sind, und sind rechtlich nicht bindend. Wir sind bestrebt, eine genaue Übersetzung des englischen Originaltexts bereitzustellen, aber aufgrund von sprachlichen Nuancen bei der Übersetzung in eine Fremdsprache können geringfügige Unterschiede bestehen. Diese Übersetzung wird Ihnen unter der Voraussetzung, dass Sie diesen rechtlichen Hinweis zur Kenntnis genommen haben, zur Verfügung gestellt. Das APC haftet nicht für die Verwendung der Übersetzung durch Sie oder einen Dritten, falls sich herausstellen sollte, dass die Übersetzung Mängel aufweist.

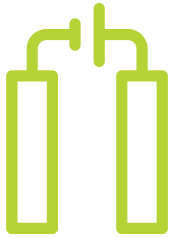
automotive council UK

ADVANCED PROPULSION CENTRE UK

Überblick: Brennstoffzellen

Von der Nischenanwendung zur gängigen Technologie

- In den letzten fünf Jahren wurden weltweit 15 000 Brennstoffzellenfahrzeuge (Fuel Cell Electric Vehicle; FCEV) verkauft, davon 7 500 allein im Jahr 2019. Die asiatischen Modelle Hyundai Nexo, Toyota Mirai und Honda Clarity dominierten den Markt. Es wird erwartet, dass der Absatz von Brennstoffzellenfahrzeugen in China und Japan bis 2030 jeweils eine Million bzw. 800 000 Fahrzeuge pro Jahr erreichen wird.
- Mit Blick auf das Bestreben, den Verkehr CO_2-neutral zu gestalten, bieten Brennstoffzellenfahrzeuge eine Alternative zu batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen sowie eine Systemeffizienz, die mit den besten Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren in bestimmten Anwendungsfällen mithalten kann.
- Grundsätzlich gibt es zwei primäre Brennstoffzellentechnologien, die im Automobilbereich gängig sind: Polymerelektrolytbrennstoffzellen (Proton Exchange Membrane Fuel Cell; PEMFC) und Festoxidbrennstoffzellen (Solid Oxide Fuel Cell; SOFC).



Die Entwicklung der Brennstoffzelltechnologie gewinnt an Dynamik

- Produktversuche wie F-Cell und Hydrogen7 haben bei europäischen Erstausrüstern (OEM) wie Mercedes und BMW erneutes Interesse an der Entwicklung der Brennstoffzellentechnologie für ihr Portfolio geweckt. BMW hat auf der vergangenen Frankfurter Automobilausstellung sein Konzept iHydrogen NEXT vorgestellt. Jenseits des Personenverkehrs laufen im Bereich des Schwerlastverkehrs Projekte zur Entwicklung von Brennstoffzellentechnologien mit dem Ziel, das Gewicht der Batterien für Langstreckenanwendungen zu reduzieren. Mit dem Brennstoffzellen-Lkw XCIENT von Hyundai und einem im April 2020 angekündigten Joint Venture zwischen Volvo Trucks und Daimler sollen Fertigung und Kommerzialisierung von Brennstoffzellensystemen für den Einsatz in schweren Nutzfahrzeugen an Fahrt gewinnen.

- Polymerelektrolytbrennstoffzellen, die mit Wasserstoff betrieben werden, dominieren zwar den Markt, es gibt jedoch auch andere Brennstoffzellentechnologien, die mit kommerziellen Kraftstoffen genutzt werden, wie Festoxidbrennstoffzellen, die weitverbreitet sind. Dieser Fahrplan liefert Leistungskennzahlen und zeigt die technologische Entwicklung sowohl für Polymerelektrolytbrennstoffzellen als auch für Festoxidbrennstoffzellen auf.

- Die größten Herausforderungen sind der aktuell hohe Anschaffungspreis (60 000–80 000 USD für einen Mittelklassewagen), die unzureichende Infrastruktur zum Auftanken (Wasserstoff als gängigster Kraftstoff wird nicht überall angeboten) und die Notwendigkeit einer gesteigerten Systemeffizienz, um mit anderen Antriebsarten mithalten zu können. Ein wesentliches Ziel für diese vielversprechende Technologie ist es, eine Kombination aus Vorteilen in den Bereichen Kosten, Effizienz und Haltbarkeit zu erreichen.

Ein vollständiges Glossar ist am Ende dieses Berichts zu finden.

Vorwort und Danksagungen

The APC would like to acknowledge the extensive support provided by industry and academia in development and publishing this roadmap.

We are grateful to the Automotive Council for entrusting us with the product and technology roadmaps refresh and their continued support.

This work has received significant support from BEIS (Department for Business, Energy and Industrial Strategy).

Neville Jackson
Im Namen des
UK Automotive Council

Ich freue mich, Ihnen den Technologiefahrplan 2020 für Antriebstechnik in der Automobilindustrie vorstellen zu können, den das Advanced Propulsion Centre (im Folgenden „APC“) in enger Zusammenarbeit mit der Industrie entwickelt hat. In diesen Fahrplänen werden entscheidende Ziele für die Zukunft und die vielversprechendsten Wege zu einem CO_2-freien und nachhaltigeren künftigen Fuhrpark aufgezeigt. Sie sind ein wesentliches Instrument für die Entwicklung einer gezielten FuE-Agenda, die insbesondere für gemeinsame Innovationen relevant ist.

Die Fahrpläne, die auf den Grundlagen der vorherigen Fahrpläne des UK Automotive Council aufbauen, wurden vom APC im Jahr 2017 ausgearbeitet. Sie wurden auf den neuesten Stand gebracht, um zu verdeutlichen, wie dringend das Ziel des Vereinigten Königreichs, bis 2050 Netto-Null-Emissionen zu erreichen, angegangen werden muss. Der Wandel im Bereich der Antriebstechnologien wurde in den letzten Jahren erheblich beschleunigt: Die Verbreitung von Fahrzeugen mit Elektroantrieb nimmt zu, die Preise für Batterien sind schneller gesunken als zunächst angenommen, alternative CO_2-freie Technologien wie Brennstoffzellen kommen in einer beeindruckenden Geschwindigkeit zur Marktreife und saubere Kraftstoffe, unter anderem Wasserstoff, sind auf dem Vormarsch, um derzeitige fossile Kraftstoffe zu ersetzen.

Dabei gilt es allerdings große Herausforderungen zu bewältigen, da der Wandel noch schneller vonstattengehen muss. Voraussetzung dafür ist eine intensivere Forschung und Entwicklung sowie die Kommerzialisierung, wodurch erschwingliche Produkte auf den Markt gebracht werden, die für Verbraucher noch attraktiver sind. Die Technologiefahrpläne 2020 beruhen auf Umfragen unter Branchenexperten und Panels und liefern einen konsolidierten Überblick über zukünftige Ziele, Technologien und Zeithorizonte für Automobilantriebe.

Mit dem Bericht bieten wir der Automobilindustrie Erkenntnisse und eine gemeinsame technologische Ausrichtung, um die Entwicklung und Bereitstellung erstklassiger Lösungen zu beschleunigen. Die Fahrpläne stellen eine wichtige Informationsquelle dar, wenn es darum geht, gemeinsame FuE-Möglichkeiten zu erschließen, um die künftigen Herausforderungen in den Bereichen Mobilität, Gütertransport und Forschung und Entwicklung von nicht für den Straßenverkehr bestimmten Fahrzeugen (Off-Highway-Fahrzeugen) anzugehen.

Prof. Rob Morgan
Universität Brighton

In diesem Fahrplan werden die umfangreichen internationalen Forschungsarbeiten im Bereich der Brennstoffzellen in einer prägnanten Übersicht mit den Herausforderungen und Chancen des massenhaften Einsatzes der Technologie im Straßenverkehr zusammengefasst. Der Fahrplan wurde als Teil eines umfassenden Projekts entwickelt, bei dem die Produktanforderungen der verschiedenen Segmente des Verkehrssektors und alternative Technologien gleichzeitig betrachtet werden. Dieser allgemeinere Blickwinkel ermöglicht eine bessere Sicht auf die wesentlichen Kosten-, Lebensdauer- und Leistungsziele und die grundlegende Rolle von Brennstoffzellen, die neben anderen Technologien bei der Realisierung eines Verkehrssektors mit Netto-Null-Emissionen zum Tragen kommen.

Prof. Dan Brett
University College London (UCL)

Wir brauchen Zielvorgaben mit einem festgelegten Zeitrahmen, um Fortschritte zu messen, Technologien weiterzuentwickeln und die Marktreife einzuschätzen. Dies ist insbesondere bei neuen Technologien wie der Brennstoffzelle entscheidend, die sich in einer kritischen Phase ihrer Kommerzialisierung befindet. Der Ansatz des APC basiert auf den Erkenntnissen der wichtigsten internationalen Fahrpläne, liefert Prognosen für die Markteinführung und zeichnet ein konsolidiertes Bild der Fortschritte im Bereich Brennstoffzellentechnologie und der Kosten. Die kritischen technologischen Entwicklungen, die zur Verwirklichung dieser Ziele erforderlich sind, werden ebenfalls berücksichtigt.

Prof. Nigel Brandon
Imperial College of Science and Technology, London

Immer mehr Menschen erkennen die wichtige Rolle an, die die Brennstoffzellentechnologie bei der Dekarbonisierung vieler Sektoren, einschließlich des Verkehrssektors, spielen wird. Dieser Fahrplan soll dazu beitragen, die Prioritäten für Forschung und Innovation zu setzen, die wir brauchen, um die Kosten für Brennstoffzellen weiter zu reduzieren und die Leistung zu steigern, sodass Brennstoffzellen in leichten und schweren Nutzfahrzeugen verstärkt eingesetzt werden können.

Technologiekennzahlen für Anwendungen im Leicht- und Schwerlastbereich

Technologiekennzahlen, die die Industrie in einem wettbewerbsorientierten Massenmarkt wahrscheinlich erreichen wird. Sämtliche Kosten- und Leistungskennzahlen sind ehrgeizig, ihnen liegt jedoch die gleiche Technologie zugrunde.

		2020	2025	2035
Leichte Nutzfahrzeuge	USD/kW (System)	112	68	40
	USD/kW (Stack)	70	40	20
	Systemeffizienz[1] (%)	60	65	70
	Lebensdauer Stack (Std.)	5000	6000	8000

		2020	2025	2035
Wasserstoff-speicher[2]	Kosten für die Speicherung des Wasserstoffs im Fahrzeug (USD/kg H2)	470	365	200

		2020	2025	2035
Schwere Nutzfahrzeuge	USD/kW (System)	455	195	80
	USD/kW (Stack)	285	115	40
	Systemeffizienz[1] (%)	60	65	70
	Lebensdauer Stack (Std.)	15 000	22 000	30 000

Anmerkungen:

- Alle Indikatoren beruhen auf Durchschnittsdaten und volumenbereinigten Zahlen, die vom Energieministerium der USA (Department of Energy; DoE) und dem Gemeinsamen Unternehmen „Brennstoffzellen und Wasserstoff“ (GU FCH) bzw. in den Fahrplänen der Strategieräte Chinas und Japans veröffentlicht wurden.
- Die Werte für die Systemeffizienz beruhen auf spezifischen Nennlastwerten für Polymerelektrolyt- und Festoxidbrennstoffzellen. Sie stellen keinen Richtwert für die Kraftstoffeffizienz dar und können nicht als solche betrachtet werden.
- Es werden zwar einzelne Werte zur Effizienz angegeben, allerdings stellen sie keine genauen Kennzahlen für die Fahrzeugeffizienz in der realen Welt dar, da sie je nach Antriebstechnologie und Produktanwendung variieren.

Die Kennzahlen beruhen auf dem folgenden weltweiten Produktionsvolumen von Brennstoffzellenfahrzeugen:

2020	2025	2030	2035
15 000	50 000	750 000	> 3 000 000

1. Polymerelektrolytbrennstoffzelle bei 25 % der Nennlast; Festoxidbrennstoffzelle bei 80 % der Nennlast 2. Auf Polymerelektrolytbrennstoffzellen ausgerichtete Technologie

Die Kennzahlen beziehen sich über alle Kosten- und Leistungsbereiche hinweg immer auf die gleiche Technologie.

Technologiekennzahlen für Anwendungen im Leicht- und Schwerlastbereich

Technologiekennzahlen, die die Industrie in einem wettbewerbsorientierten Massenmarkt wahrscheinlich erreichen wird. Sämtliche Kosten- und Leistungskennzahlen sind ehrgeizig, ihnen liegt jedoch die gleiche Technologie zugrunde.

		2020	2025	2035
Leichte Nutzfahrzeuge	USD/kW (System)	112	68	40
	USD/kW (Stack)	70	40	20
	Systemeffizienz[1] (%)	60	65	70
	Lebensdauer Stack (Std.)	5000	6000	8000

		2020	2025	2035
Schwere Nutzfahrzeuge	USD/kW (System)	455	195	80
	USD/kW (Stack)	285	115	40
	Systemeffizienz* (%)	60	65	70
	Lebensdauer Stack (Std.)	15 000	22 000	30 000

		2020	2025	2035
Wasserstoff-speicher[2]	Kosten für die Speicherung des Wasserstoffs im Fahrzeug (USD/kg H2)	470	365	200

Anmerkungen:

- Alle Indikatoren beruhen auf Durchschnittsdaten und volumenbereinigten Zahlen, die vom Energieministerium der USA (Department of Energy; DoE) und dem Gemeinsamen Unternehmen „Brennstoffzellen und Wasserstoff“ (GU FCH) bzw. in den Fahrplänen der Strategieräte Chinas und Japans veröffentlicht wurden.
- Die Werte für die Systemeffizienz beruhen auf spezifischen Nennlastwerten für Polymerelektrolyt- und Festoxidbrennstoffzellen. Sie stellen keinen Richtwert für die Kraftstoffeffizienz dar und können nicht als solche betrachtet werden.
- Es werden zwar einzelne Werte zur Effizienz angegeben, allerdings stellen sie keine genauen Kennzahlen für die Fahrzeugeffizienz in der realen Welt dar, da sie je nach Antriebstechnologie und Produktanwendung variieren.

Die Kennzahlen beruhen auf dem folgenden weltweiten Produktionsvolumen von Brennstoffzellenfahrzeugen:

2020	2025	2030	2035
15 000	50 000	750 000	> 3 000 000

1. Polymerelektrolytbrennstoffzelle bei 25 % der Nennlast; Festoxidbrennstoffzelle bei 80 % der Nennlast 2. Auf Polymerelektrolytbrennstoffzellen ausgerichtete Technologie

Kosten- und Leistungskennzahlen

Als Schlüsselkriterien für die Einführung von Brennstoffzellen auf dem Massenmarkt wurden Kosten, Systemeffizienz und Lebensdauer ausgewählt.

		2020	2025	2035
Leichte Nutzfahrzeuge	1 USD/kW (System)	112	68	40
	2 USD/kW (Stack)	70	40	20
	3 Systemeffizienz[1] (%)	60	65	70
	4 Lebensdauer Stack (Std.)	5000	6000	8000

1 Systemkosten

Hierbei handelt es sich um die Kosten für das komplette Brennstoffzellensystem, einschließlich Stacks, Nebenaggregate und Balance-of-System, aber ohne das Brennstoffspeicher- und -förder-system.

Die Kosten müssen drastisch gesenkt werden, um die Markteinführung anzukurbeln.

2 Kosten der Stacks

Diese Kosten werden separat angegeben, da die Systemkosten nicht analog zu den Kosten der Stacks abgebildet werden können. Das Stack ist die wichtigste Einheit zur Umwandlung von chemischen Stoffen in Elektrizität. Bei wachsendem Interesse an Brennstoffzellen müssen die Kosten erheblich gesenkt werden.

3 Systemeffizienz

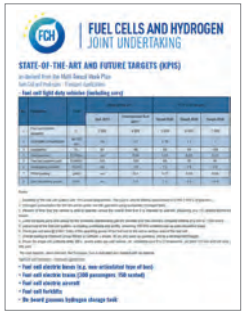
Obwohl Brennstoffzellen hohe Systemeffizienzwerte erreichen können, sollten diese Werte nicht als Maßstab für den Kraftstoffverbrauch herangezogen werden. Die realen Fahrzyklen und die Effizienz des Antriebssystems haben einen Einfluss auf die Gesamtleistung. Die angegebenen Werte gelten für Nennlasten (normaler Drehmomentbedarf bezogen auf die maximale Leistungsfähigkeit). Bei Polymerelektrolytbrennstoffzellen liegt der bei 25 % und bei Festoxidbrennstoffzellen bei 80 % der Nennlast.

4 Lebensdauer der Stacks

Dieser Wert liefert eine Schätzung der Anzahl von Stunden, die die Brennstoffzelle eine zuverlässige Leistung erbringt und die Verschleißgrenzwerte bis zur Überholung nicht überschreitet. Dies ist eine gängige Größe für Motoren, die oft als „Time Between Overhaul“ (TBO; durchschnittliche Dauer bis zur Überholung) bezeichnet wird.

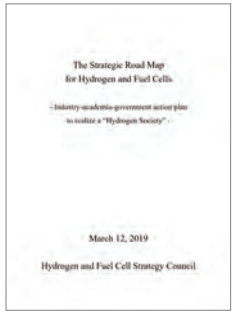
Energieministerium der USA

GU FCH der EU



China

Japan



Festlegung der Werte der Kennzahlen

Brennstoffzellen sind eine schnell reifende Technologie mit nur wenigen Referenzdaten für Fahrzeuge. Bei unserem Ansatz bedienen wir uns der Leistungskennzahlen aus zahlreichen Arbeiten des Energieministeriums der USA, des GU FCH der EU und der hier vorgestellten Fahrpläne der Strategieräte in China und Japan.

Jeder Bericht enthält unterschiedliche Annahmen für die Nachfrage oder Herstellung von Brennstoffzellen. Zur Ermittlung der Werte für diesen Bericht wurde ein volumenbereinigter Ansatz ausgewählt, der im Folgenden dargestellt wird.

Die Kennzahlen beruhen auf dem folgenden weltweiten Produktionsvolumen von Brennstoffzellenfahrzeugen:

2020	2025	2030	2035
15 000	50 000	750 000	> 3 000 000

1 Systemkosten

Das System und die Bauform für schwere Nutzfahrzeuge unterscheiden sich stark von denen für leichte Nutzfahrzeuge. Arbeitszyklus, Anwendungsfall und Balance-of-System sind jeweils einzigartig. Für eine breite Markteinführung sind erhebliche Kostensenkungen erforderlich.

2 Kosten der Stacks

Der Arbeitszyklus und die Leistungsanforderungen erfordern spezielle Brennstoffzellenkonzepte für schwere Nutzfahrzeuge. Deshalb sind die Kennzahlen höher als bei leichten Nutzfahrzeugen, aber es wird eine ähnliche Entwicklung der Kosten nach unten erwartet, da das Interesse an Brennstoffzellen für den Güterverkehr stetig wächst.

3 Systemeffizienz

Obwohl Brennstoffzellen hohe Systemeffizienzwerte erreichen können, sollten diese Werte nicht als Maßstab für den Kraftstoffverbrauch herangezogen werden. Die realen Fahrzyklen und die Effizienz des Antriebssystems haben einen Einfluss auf die Gesamtleistung. Die angegebenen Werte gelten für Nennlasten (normaler Drehmomentbedarf bezogen auf die maximale Leistungsfähigkeit). Bei Polymerelektrolytbrennstoffzellen liegt der bei 25 % und bei Festoxidbrennstoffzellen bei 80 % der Nennlast.

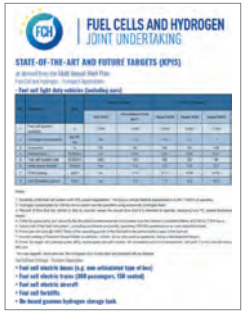
4 Lebensdauer der Stacks

Dieser Wert liefert eine Schätzung der Anzahl von Stunden, die die Brennstoffzelle eine zuverlässige Leistung erbringt und die Verschleißgrenzwerte bis zur Überholung nicht überschreitet. Die Werte sind höher als bei leichten Nutzfahrzeugen, da die Flotten höhere Nutzungsraten erreichen und die Gesamtbetriebskosten wettbewerbsfähig sein müssen.

		2020	2025	2035
Schwere Nutzfahrzeuge	1 USD/kW (System)	455	195	80
	2 USD/kW (Stack)	285	115	40
	3 Systemeffizienz* (%)	60	65	70
	4 Lebensdauer Stack (Std.)	5 000	22 000	30 000

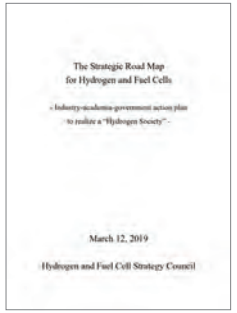
Energieministerium der USA

GU FCH der EU



China

Japan



Festlegung der Werte der Kennzahlen

Brennstoffzellen sind eine schnell reifende Technologie mit nur wenigen Referenzdaten für Fahrzeuge. Bei unserem Ansatz bedienen wir uns der Leistungskennzahlen aus zahlreichen Arbeiten des Energieministeriums der USA, des GU FCH der EU und der hier vorgestellten Fahrpläne der Strategieräte in China und Japan.

Jeder Bericht enthält unterschiedliche Annahmen für die Nachfrage oder Herstellung von Brennstoffzellen. Zur Ermittlung der Werte für diesen Bericht wurde ein volumenbereinigter Ansatz ausgewählt, der im Folgenden dargestellt wird.

Die Kennzahlen beruhen auf dem folgenden weltweiten Produktionsvolumen von Brennstoffzellenfahrzeugen:

2020	2025	2030	2035
15 000	50 000	750 000	> 3 000 000

Technologiekennzahlen für Anwendungen im Leicht- und Schwerlastbereich

Technologiekennzahlen, die die Industrie in einem wettbewerbsorientierten Massenmarkt wahrscheinlich erreichen wird. Sämtliche Kosten- und Leistungskennzahlen sind ehrgeizig, ihnen liegt jedoch die gleiche Technologie zugrunde.

		2020	2025	2035
Leichte Nutzfahrzeuge	USD/kW (System)	112	68	40
	USD/kW (Stack)	70	40	20
	Systemeffizienz1 (%)	60	65	70
	Lebensdauer Stack (Std.)	5 000	6 000	8 000

		2020	2025	2035
Schwere Nutzfahrzeuge	USD/kW (System)	455	195	80
	USD/kW (Stack)	285	115	40
	Systemeffizienz* (%)	60	65	70
	Lebensdauer Stack (Std.)	15 000	22 000	30 000

		2020	2025	2035
Wasserstoff-speicher[2]	Kosten für die Speicherung des Wasserstoffs im Fahrzeug (USD/kg H2)	470	365	200

Wasserstoffspeicher

Hierbei handelt es sich um eine separate Technologiekennzahl für Polymerelektrolytbrennstoffzellen. Wasserstoff lässt sich wegen seiner sehr geringen volumetrischen Energiedichte nur schwer speichern. In Wasserstofftanks für Kraftfahrzeuge wird auf 350 bar (5 000 psi) und 700 bar (10 000 psi) komprimierter Wasserstoff verwendet, weshalb hochfeste Werkstoffe wie kohlenstoffverstärkter Kunststoff benötigt werden. Zudem müssen Druckbehälter erheblich verstärkt werden. Dies geht zulasten des Gewichts und der Kosten.

Kosten für die Speicherung des Wasserstoffs im Fahrzeug

Die Kosten für die Speicherung des Wasserstoffs im Fahrzeug machen einen großen Teil des gesamten Systems der Polymerelektrolytbrennstoffzelle aus. Die angegebenen Werte stammen überwiegend aus den Veröffentlichungen des Referats für Antriebstechnologien des Energieministeriums der USA und des GU FCH. In den Benchmarkberichten wurden unterschiedliche Speichertechnologien, wie Absorbersysteme, Metallhydridspeicher und chemische Regenerationssysteme, berücksichtigt. Die Kosten der Speichersysteme werden in USD pro kg benötigten Wasserstoff angegeben.

Wasserstoffpreis (Brennstoffversorgung)

Der Preis von Wasserstoff (in kg) ändert sich ständig und hängt mit der Entwicklung des Angebots und der Infrastruktur zusammen. Er wird vom Markt, der Nachfrage und den Anreizen der lokalen Behörden bestimmt und wurde daher nicht in die Liste der Kennzahlen des Fahrplans aufgenommen.

Nach aktuellen Schätzungen (2020) liegt der Durchschnittspreis bei 14 USD/kg (Kalifornien bei 16 USD/kg). Dieser Preis wird bis 2035 wahrscheinlich rasch auf 4–6 USD/kg sinken, da Marktakzeptanz und Interesse zunehmen. Laut einigen Schätzungen in der EU könnten die Kosten bis 2035 bei lediglich 3 USD/kg für Wasserstoff liegen.

Fahrplan 2020
Brennstoffzellen

Technologiefahrplan

Technologiekennzahlen für die Jahre 2020–2035 finden Sie auf Seite 1.

automotive council UK

ADVANCED PROPULSION CENTRE UK

Dieser Fahrplan stellt eine Momentaufnahme der weltweiten Prognosen für Antriebstechnologien in der Automobilindustrie für den Massenmarkt dar. Anwendungsspezifische Technologien können je nach Region unterschiedlich sein.

Heller Balken: Spezifische Technologien für Festoxidbrennstoffzellen für den Massenmarkt

Dunkler Balken: Herkömmliche oder Polymerelektrolytbrennstoffzellen – die Technologie ist auf dem Massenmarkt etabliert. In diesem Zeitrahmen werden bahnbrechende Innovationen erwartet.

Übergang: Ein Übergang bedeutet kein Rückzug aus dem Markt, sondern eine Neuausrichtung des FuE-Schwerpunkts.

Balken mit gestrichelter Linie: Marktreife: Die Technologie hat Marktreife erreicht. Sie verbleibt voraussichtlich im Massenmarkt, bis sie verdrängt wird.

Brennstoffzellenstack

- Katalysatoren mit geringem Platinmetallgehalt, günstige, haltbare Membrane → Membranwerkstoffe für Betriebstemperaturen über 120 °C → Platinmetalle mit höherer Leistung und Kraftstoffeffizienz
- Für Lebensdauer optimierte Bipolarplatten und Beschichtungen → Kostenoptimierte Platten für die Massenherstellung → Neuartige Werkstoffe für Bipolarplatten
- Elektrode und Gasdiffusionsschicht für mehr Leitfähigkeit und geringere Kosten → Alternativen für Gasdiffusionsschichten, neue Elektrodentechnologien
- Werkstoffe, die viele handelsübliche Kraftstoffe tolerieren → Zellen mit einer niedrigeren Betriebstemperatur unter 450 °C

Balance-of-System

Thermosysteme

- Kompakte und effiziente Wärmetauscher → Integrierte Thermomanagementsysteme
- Kaltstartunterstützung, d. h. Batterie, Speicherung thermischer Energie, bessere thermische Trägheit
- Wärmeeffizienz: Wärmerückgewinnung, Reformer, Wärmetauscher → Günstiges energiesparendes Thermomanagement

Energie- und Nebenaggregatmanagement

- Degradationsmanagement für die Zelllebensdauer → Integrierte Zelldiagnose, -management und -selbstheilung für bessere Stack-Lebensdauer
- Weniger parasitäre Verluste und lokale Energiebedarfssteuerung → Rationalisierung von Nebenaggregaten, Integration in Hybridbatteriesysteme, Kostenoptimierung
- Hocheffiziente Spannungswandler → Integration von DC/DC-Wandlern in Hochspannungsverteilersysteme und Wechselrichter

Lüftungssysteme und Fluid-Handling

- Beständigere und günstigere Gebläse, Kompressoren und Expander → Kostengünstigere und beständigere Luftkompressoren und Filter
- Fluid Handling, leistungsstärkeres und günstigeres Wassermanagement → Fluid-Management der nächsten Generation und kleinere Kühler

Kraftstoffspeicherung und -management

Speicherung und Kraftstoff

- Leichte, kostengünstige CFK-Wasserstofftanks → Kostengünstige, langlebige CFK-H2-Tanks für den Massenmarkt → Bessere Tankkonstruktion: Anpassung an Raum, neue Werkstoffe & Lebensdauer
- Kryogene Speicherung & Speicherung von Flüssig-H2 → Zunehmende Speicherung von Flüssig- und Festkörperwasserstoff (z. B. Hydrid)
- Auf mehrere Kraftstoffe ausgelegte SOFC → SOFC für CO_2-arme Mischkraftstoffe → SOFC für Kraftstoffe ohne Nettoemissionen

Förderung

- Bessere H2-Qualität als Kraftstoff, Pumpen, Anschlüsse, Regler, Ventile und Düsen → Wasserstoffreinigung im Fahrzeug, Flüssigwasserstoffsysteme, Fördersysteme für Festkörperwasserstoff
- Kleinere und effizientere Kraftstoffreformersysteme → **An Kraftstoffe mit Netto-Null-Emissionen angepasste Fördersysteme**

Kontrollsysteme

- On-Board-Diagnose und modellprädiktive Regelung für mehr Effizienz, Beständigkeit und Lebensdauer → Selbstlernende KI-Steuerungen
- Interne Sensoren und Software zur Verbesserung der Leistung und Lebensdauer → Genormte und einheitliche Kontrollsysteme für den Massenmarkt

Ökobilanz

- Umweltorientierte Verfahren, z. B. für die Herstellung von MEA und Katalysatoren → Effiziente Rückgewinnung hochwertiger Werkstoffe, z. B. Platin, CFK → Auf Ökobilanz ausgerichtete Wertschöpfungsketten
- Entwicklung mit Blick auf Netto-Null-Emissionen und Demontage → Weitgehend CO_2-freie, energieeffiziente Herstellung und Recycling → Herstellungssysteme mit Netto-Null-Emissionen

2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | ...

Primäre Technologiebereiche

Brennstoffzellenstack

Der Begriff **Brennstoffzellenstack** umfasst alle Bestandteile eines Brennstoffzellenstacks. Bei Polymerelektrolytbrennstoffzellen sind dies vor allem die Bipolarplatten (die Elektroden), die Membranelektrodeneinheiten (MEA; bestehend aus Membranen, Beschichtungen, Gasdiffusionsschichten (Gas Diffusion Layers; GDL) und Katalysatoren), die Isolierung und die Endplatten. Spezifische Informationen für Festoxidbrennstoffzellen werden separat geliefert, da die Zellen anders aufgebaut sind. Sie können planar oder röhrenförmig aufgebaut sein, mit einer Anoden-, Kathoden- und Elektrolyteinheit.

Balance-of-System

- Thermosysteme
- Energie- und Nebenaggregat-management
- Lüftungssysteme und Fluid-Handling

Unter **Balance-of-System** versteht man alle unterstützenden Komponenten und Nebenaggregate einer Brennstoffzelle, die für die Bereitstellung und das Management von Energie im automobilen Arbeitszyklus benötigt werden.

Thermosysteme: Wärmetauscher und integrierte Thermomanagementsysteme können die Systemeffizienz steigern. Abwärmenutzung, thermische Kaltstartunterstützung und Reformer für Festoxidbrennstoffzellen sind wichtige Themen im Fahrplan.

Das **Energie- und Nebenaggregatmanagement** umfasst das Zellmanagement, Spannungswandlertechnologien, die Energiearchitektur und das gesamte Balance-of-Systemmanagement zur Steigerung der Effizienz.

Lüftungssysteme und Fluid-Handling: Gebläse, Befeuchter, Kompressoren, Expander und Wassermanagementsysteme bieten Möglichkeiten zur Verbesserung der Haltbarkeit und zur Reduzierung der Kosten und der Größe.

Kraftstoff-speicherung und -management

- Speicherung und Kraftstoff
- Förderung

Speicherung und Kraftstoff: Zu Polymerelektrolytbrennstoffzellen und Festoxidbrennstoffzellen gibt es unterschiedliche Überlegungen zum Thema Kraftstoff. Die Entwicklung der Wasserstoffspeicherung für Polymerelektrolytbrennstoffzellen und die Einführung von Kraftstoffen mit Netto-Null-Emissionen für Festoxidbrennstoffzellen werden im Fahrplan separat dargestellt.

Förderung: Bei Polymerelektrolytbrennstoffzellen müssen Pumpen, Anschlüsse, Regler, Ventile und Düsen angepasst werden, wenn sich die Beschaffenheit von Wasserstoff ändert und neue Methoden für die Speicherung im Fahrzeug entwickelt werden. Reformer und Kraftstoffördersysteme werden mit der Einführung von Kraftstoffen mit Netto-Null-Emissionen optimiert.

Kontrollsysteme

Kontrollsysteme: Neue Sensoren, Softwareentwicklungen, die On-Board-Diagnose und die modellprädiktive Regelung sind unerlässlich, wenn es darum geht, die Kraftstoffkosten zu senken und die Leistung und Alterungsbeständigkeit zu optimieren.

Ökobilanz

Die **Ökobilanz** umfasst die Energieintensität, die ökologischen Auswirkungen, den Ressourcenverbrauch, die Recyclingkette für Brennstoffzellenkomponenten und Fertigungsverfahren.

2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040

Brennstoffzellenstack

Zur Senkung der Kosten und zur Verbesserung der Effizienz und der Lebensdauer von Brennstoffzellen müssen Werkstoffe in allen Teilen des Stacks weiterentwickelt werden.

Fahrplan 2020
Brennstoffzellen | Technologiefahrplan

Brennstoffzellenstack

1. Katalysatoren mit geringem Platinmetallgehalt, günstige, haltbare Membrane → Membranwerkstoffe für Betriebstemperaturen über 120 °C → Platinmetalle mit höherer Leistung und Kraftstoffeffizienz
2. Für Lebensdauer optimierte Bipolarplatten und Beschichtungen → Kostenoptimierte Platten für die Massenherstellung → Neuartige Werkstoffe für Bipolarplatten
3. Elektrode und Gasdiffusionsschicht für mehr Leitfähigkeit und geringere Kosten → Alternativen für Gasdiffusionsschichten, neue Elektrodentechnologien
4. Werkstoffe, die viele handelsübliche Kraftstoffe tolerieren → Zellen mit einer niedrigeren Betriebstemperatur unter 450 °C

Balance-of-System
- Thermosysteme
- Energie- und Nebenaggregat-management
- Lüftungssysteme und Fluid-Handling

Kraftstoff-speicherung und -management
- Speicherung und Kraftstoff
- Förderung

Kontrollsysteme

Ökobilanz

1 Platinmetalle und Membranwerkstoffe

Die Verwendung von Platinmetallen in Polymerelektrolytbrennstoffzellen, die zur Leistungssteigerung von Membranelektrodeneinheiten eingesetzt werden, ist kostenintensiv. Höchstwahrscheinlich werden sie deutlich weniger verwendet und ihre Menge wird von etwa 30 g auf 6–9 g pro System sinken, da Kostensenkungen angestrebt werden.

Die Betriebstemperaturen für Polymerelektrolytbrennstoffzellen, die normalerweise bei 60–80 °C liegen, könnten auf über 120 °C steigen, um eine effizientere Energieumwandlung zu gewährleisten.

Kostengünstige und hochleistungsfähige Kathoden mit oder ohne Platinmetallen können die Kosten für Zellen drastisch senken, da die Herausforderungen der Herstellung, der Integration von Ionomeren und der Kathodenverluste überwunden werden.

2 Bipolarplatten und Beschichtungen

Bipolarplatten sind eine zentrale Komponente, die Brenngas und Luft gleichmäßig verteilen, den elektrischen Strom von Zelle zu Zelle leiten, Wärme aus dem aktiven Bereich abführen und das Austreten von Gasen und Kühlmittel verhindern.

Die Platten müssen eine elektrische Leitfähigkeit aufweisen, chemisch hoch beständig und thermisch leitfähig sein, um eine bessere Wärmeübertragung durch die Zelle sicherzustellen.

Werkstoffe, Beschichtung und Verfahren für die Massenfertigung müssen weiterentwickelt werden, um Kosten zu senken und die Lebensdauer zu verbessern.

3 Innovationen für Elektroden und Gasdiffusionsschichten

Gasdiffusionsschichten, die Teil der Membranelektrodeneinheit sind, sind poröse Komponenten, die üblicherweise aus einer dichten Anordnung von Kohlenstofffasern bestehen und elektrisch leitfähige Komponenten für die Stromabnahme enthalten. Sie übernehmen auch den Transport von Reaktionsmitteln, die Wärme-/Wasserableitung, die mechanische Unterstützung und bieten Korrosionsschutz.

Es wird daran gearbeitet, neuartige flexible, dünne, kostengünstige und hochleistungsfähige Gasdiffusionsschichten mit niedrigen Präparationstemperaturen und geringem Energie-verbrauch zu entwickeln.

4 Zellwerkstoffe für Festoxidbrennstoffzellen

Kathoden und Anoden werden normalerweise aus porösen Keramikwerkstoffen hergestellt, wobei der Elektrolyt aus einer dichten sauerstoff- und ionenleitenden Keramik besteht. Damit diese Technologie an verschiedene Kraftstoffe angepasst werden kann, um die Handlungsfelder Dekarbonisierung und Netto-Null-Emissionen zu erreichen, müssen Kraftstoff- und Zelltechnologie optimiert werden. Alternative kostengünstige Elektrodenwerkstoffe, die Vorteile in den Bereichen Leistung und Lebensdauer ermöglichen, sind unerlässlich.

Auf lange Sicht kann der Betrieb von Festoxidbrennstoffzellen bei niedrigeren Temperaturen im Vergleich zu jetzt (600 °C) dazu beitragen, den Energiebedarf und somit die Energiekosten für den Betrieb der Brennstoffzellen zu senken. Innovationen im Bereich der nanoskalierten Elektrolytstrukturen haben bewiesen, dass die Betriebstemperatur auf etwa 350 °C gesenkt werden kann.

2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040

Balance-of-System

Um eine korrekte Betriebstemperatur mit einer hohen thermischen Gesamtleistung zu erreichen und diese auch zu halten, müssen in sämtlichen Bereichen des Thermosystems der Brennstoffzellen Verbesserungen erreicht werden.

Brennstoffzellenstack

Das **Balance-of-System**, das allgemein auch als „Balance-of-Plant“ bezeichnet wird, übernimmt die Aufbereitung oder Reformierung des Kraftstoffs, das Thermomanagement, das Luft-Handling und die Konditionierung der elektrischen Energie. Es wird benötigt, damit die komplette Brennstoffzelle funktioniert und kontinuierlich elektrischen Strom liefert.

Balance-of-System

- Thermosysteme
- Energie- und Nebenaggregat-management
- Lüftungssysteme und Fluid-Handling

1. Kompakte und effiziente Wärmetauscher → Integrierte Thermomanagementsysteme
2. Kaltstartunterstützung, d. h. Batterie, Speicherung thermischer Energie, bessere thermische Trägheit
3. Wärmeeffizienz: Wärmerückgewinnung, Reformer, Wärmetauscher → Günstiges energiesparendes Thermomanagement

Kraftstoff-speicherung und -management

- Speicherung und Kraftstoff
- Förderung

Kontrollsysteme

Ökobilanz

1 Verbesserung des Thermomanagements

Es ist von entscheidender Bedeutung, dass die Brennstoffzelle auf der korrekten Betriebstemperatur gehalten wird. Je nach Art der Brennstoffzelle kann die optimale Temperatur von 80 °C bei Polymerelektrolytbrennstoffzellen bis zu 1000 °C bei bestimmten Hochtemperatur-Festoxidbrennstoffzellen reichen. Werte außerhalb des vorgegebenen Temperaturbereichs können zum Effizienzverlust führen. Die Temperaturen werden durch verschiedene Wärmequellen und Wärmeableitungs- und Kühlsysteme aufrechterhalten.

Fortschrittliche Wärmetauscher, Kühlwege, Rezirkulationssysteme für Wärme sowie Kondensatoren bieten verschiedene Optionen zur Entwicklung effizienter und kostengünstiger Lösungen.

Wenn die Thermosysteme der Brennstoffzellen in das thermische System des Fahrzeugs integriert werden, bietet das Vorteile in Bezug auf Synergien zwischen Komponenten. Allerdings stellt dies auch eine Herausforderung dar.

2 Kaltstartunterstützung für Festoxidbrennstoffzellen

Durch den Betrieb bei mittleren bis hohen Temperaturen (600–1000 °C) werden die in Festoxidbrennstoffzellen eingesetzten Kraftstoffe innerhalb der Brennstoffzelle selbst reformiert, ohne dass eine externe Reformierung oder ein Metallkatalysator erforderlich ist.

Damit die Zelle auf diese Temperatur gebracht werden kann, wird beim Start eine Strom- oder Wärmequelle benötigt, bevor die Zelle von selbst arbeiten kann. Daher werden Festoxidbrennstoffzellen oft mit einer entsprechenden Batterie verbunden.

Energiespeicherlösungen im Fahrzeug, die Wärme erzeugen und liefern, bringen Vorteile für die Gesamteffizienz von Festoxidbrennstoffzellen.

3 Wärmeeffizienz bei Festoxidbrennstoffzellen

Alternative Wärmeabgabesysteme und das On-Board-Management, z. B. über Verbesserungen bei Wärmetauschern und Reformern, in die die Wärmerückgewinnung und Ersatzwärmequellen (z. B. aus dem Fahrzeug) integriert werden, bieten Vorteile bei der Energieeffizienz und Kosteneinsparungen für das Gesamtsystem.

Bei kostengünstigen Festoxidbrennstoffzellenstacks mit niedrigen Temperaturen (500–600 °C), die derzeit auf dem Markt erhältlich sind, wird Cer-Gadoliniumoxid (CGO) anstelle der derzeitig in der Industrie üblichen Keramik verwendet, wodurch Edelstahl zur Unterstützung der Keramik an den Elektroden zum Einsatz kommen kann.

2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040

Balance-of-System

Es bestehen Möglichkeiten, das Zellmanagement zu verbessern und Nebenaggregate zu rationalisieren. Mithilfe einer verbesserten Integration des Strommanagements in die bestehenden Fahrzeugsysteme können Kosten und Verluste reduziert werden.

Brennstoffzellenstack

Balance-of-System
- Thermosysteme
- Energie- und Nebenaggregat-management
- Lüftungssysteme und Fluid-Handling

Kraftstoff-speicherung und -management
- Speicherung und Kraftstoff
- Förderung

Kontrollsysteme

Ökobilanz

1 Degradationsmanagement für die Zelllebensdauer → Integrierte Zelldiagnose, -management und -selbstheilung für bessere Stack-Lebensdauer

2 Weniger parasitäre Verluste und lokale Energiebedarfssteuerung → Rationalisierung von Nebenaggregaten, Integration in Hybridbatteriesysteme, Kostenoptimierung

3 Hocheffiziente Spannungswandler → Integration von DC/DC-Wandlern in Hochspannungsverteilersysteme und Wechselrichter

1 Degradation und Zellmanagement

Bei Brennstoffzelle müssen verschiedene Betriebsbedingungen erfüllt sein, um eine hohe Leistung und Lebensdauer zu erreichen. Verbesserungen der Konstruktion und der Tests für die Zellvalidierung helfen dabei, die Bauform in Bezug auf mehr Zellgesundheit zu optimieren. Auf lange Sicht könnten Innovationen für die eingebauten Zellkomponenten und das Softwaremanagement zu einer verbesserten Lebensdauer der Zelle führen, wenn die Bestandteile des Reformers und der Membran-elektrodeneinheit neu aufeinander abgestimmt werden.

2 Weniger Verluste und Energierationalisierung

Brennstoffzellenstacks benötigen zahlreiche Neben-aggregate, damit sie kontinuierlich mit Energie versorgt sind. Dazu gehören unter anderem Gebläse, Kompressoren, Filtersysteme, Wassermanagement, Wärmetauscher, Systeme zur Konditionierung des Tanks usw. Diese Nebenaggregate verbrauchen jedoch Strom. Werden die Verluste durch diese Systeme verringert, erhöht dies die Gesamteffizienz des Systems.

Die künftige Rationalisierung von Komponenten und die Vereinfachung der Brennstoffzellenarchitektur können zu erheblichen Kostenersparnissen führen. So könnten z. B. gemeinsame Energiemanagementfunktionen in die Batterie oder andere Stromsysteme des Fahrzeugs integriert werden.

3 Spannungswandler und DC-Integration für mehr Effizienz

Brennstoffzellen haben eine niedrigere und variablere Ausgangsspannung als das Batteriesystem, daher ist ein Gleichspannungswandler (DC/DC-Wandler) erforderlich. Um die Verluste zu reduzieren, braucht es hocheffiziente leistungselektronische Wandler.

Die Leistungselektronik im Fahrzeug kann zusammengeführt werden, z. B. können DC/DC-Wandler mit dem Hochspannungs-Leistungsverteiler des Antriebssystems zusammengeführt werden. Wenn weniger Systeme vorhanden sind, werden dadurch nicht nur Verluste reduziert, sondern auch Kostenvorteile erzielt.

2020 2025 2030 2035 2040

Balance-of-System

Für leichtere, kompaktere und zuverlässigere Stacks werden spezielle Konstruktionen für Lüftungssysteme und Optimierungen der Fluid-Handling-Systeme benötigt, um die hohen Anforderungen zu erfüllen.

Brennstoffzellenstack

Balance-of-System
- Thermosysteme
- Energie- und Nebenaggregat-management
- Lüftungssysteme und Fluid-Handling

1 Beständigere und günstigere Gebläse, Kompressoren und Expander → Kostengünstigere und beständigere Luftkompressoren und Filter

2 Fluid Handling, leistungsstärkeres und günstigeres Wassermanagement → Fluid-Management der nächsten Generation und kleinere Kühler

Kraftstoff-speicherung und -management
- Speicherung und Kraftstoff
- Förderung

Kontrollsysteme

Ökobilanz

1 Optimierung der Lüftungssysteme

Kommerzielle Standardkompressoren und -Befeuchtungssysteme sind nicht immer für automobile Brennstoffzellenanwendungen geeignet. Das Verdichtungsverhältnis muss so gut wie möglich an den Arbeitsdruck der Brennstoffzelle angepasst werden, um eine hohe Effizienz zu erreichen.

Die Lüftungssysteme bestimmen die Größe und das Volumen des Stacks. Optimierte Systeme führen zu leichteren und kompakteren Stacks, die wiederum weniger Nebenaggregate benötigen.

Mit der zunehmenden Verbreitung von Brennstoffzellen müssen auch Aspekte wie Zuverlässigkeit, Lebensdauer und Kosten von Luftkompressions- und Filtersystemen optimiert werden.

2 Optimierung von Fluid-Handling-Systemen

Die Membran in Polymerelektrolytbrennstoffzellen muss ständig mit Feuchtigkeit versorgt werden. Das bedeutet, dass Wasser genau in dem Maße verdampft werden muss, wie es erzeugt wird. Wenn das Wasser zu schnell verdampft, dann trocknet die Membran aus, der Widerstand in ihr steigt und schließlich reißt sie. Wenn das Wasser zu langsam verdampft, dann werden die Elektroden überflutet, wodurch die Reaktanten den Katalysator nicht erreichen und die Reaktion unterbrochen wird. Leichtere, kleinere Stacks, die mit einem niedrigeren Druck betrieben werden, benötigen weniger Wasser für die Membranbefeuchtung, sodass ein einfacheres und kostengünstigeres System entsteht.

Ein integriertes System zur direkten Wassereinspritzung bringt Vorteile für die Luftbefeuchtung, da es besser eingestellt werden kann, weniger Strom verbraucht und kompakt ist.

Wasser ist ein häufiges Nebenprodukt der Reaktion in Festoxidbrennstoffzellen und muss beherrscht werden. Bei Systemen der nächsten Generation gibt es die Möglichkeit, kleinere Wärmetauscher einzusetzen. Wenn sich diese Technologie weiter durchsetzt, werden die Wärmetauscher zunehmend in Kreislaufverfahren hergestellt, die Kosten werden konsolidiert und ihre Bauform wird sich verändern.

2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040

Kraftstoffspeicherung und -management

Neue Tankwerkstoffe und flüssige oder feste Alternativen zu gasförmigem Wasserstoff könnten die Förderung und Speicherung vereinfachen. Bei Festoxidbrennstoffzellen, in denen Standardkraftstoffe verwendet werden, besteht die Herausforderung darin, erfolgreich auf emissionsfreie Kraftstoffe umzusteigen.

Brennstoffzellenstack

Balance-of-System
- Thermosysteme
- Energie- und Nebenaggregat-management
- Lüftungssysteme und Fluid-Handling

Kraftstoff-speicherung und -management
- Speicherung und Kraftstoff
- Förderung

Kontrollsysteme

Ökobilanz

1 CFK-Tanks für die Wasserstoffspeicherung

Bei Polymerelektrolytbrennstoffzellen werden spezielle Wasserstofftanks benötigt. Hierbei handelt es sich um spezielle Hochdruckbehälter, die derzeit auf 350 bar (5000 psi) ausgelegt sind und zukünftig 700 bar (10 000 psi) standhalten sollen, die jedoch in der Herstellung teuer sind. CFK ist aufgrund seiner hohen Festigkeit die gängige Werkstoffwahl, hat jedoch seinen Preis. Für die Herstellung von CFK sind ein hoher Arbeitsaufwand und Energieeinsatz erforderlich. Für Anwendungen für den Massenmarkt braucht es kostengünstige, äußerst widerstandsfähige Wasserstoff-tanks.

Auf lange Sicht gehen die Hersteller davon aus, dass sich neue Tankwerkstoffe herausbilden und auf die Speicherung von gasförmigem Wasserstoff verzichtet wird. Dies ermöglicht neuartige und neue Tankkonstruktionen, wie z. B. geformte Tanks, die an den verfügbaren Bauraum im Fahrzeug angepasst werden.

2 Flüssig- und Festkörperwasserstoff

Bei Polymerelektrolyt-Fördersystemen im Fahrzeug könnte bereits ab 2030 die kryogene Speicherung von Flüssigwasserstoff zur Anwendung kommen. Flüssig-wasserstoff kann besser gespeichert und gefördert werden als gasförmiger Wasserstoff, allerdings muss er bei sehr niedrigen Temperaturen gelagert werden.

Eine weitere Alternative zu gasförmigem Wasserstoff wäre Festkörperwasserstoff. Metallhydride, die durch eine reversible Reaktion von gasförmigem Wasserstoff mit einem hydridbildenden Metall, einer Legierung oder einer intermetallischen Phase gebildet werden, gelten als besonders vielversprechend für verschiedene Endverbraucheranwendungen. Durch die Verwendung von Metallhydriden wird eine sehr hohe volumetrische Wasserstoffdichte erreicht und die Speicherung wird einfacher.

3 Kraftstoffe für Festoxidbrennstoffzellen

In dieser Hinsicht bieten Festoxidbrennstoffzellen einen Vorteil, da bei ihnen handelsübliche Kraftstoffe zum Einsatz kommen. Da die Brennstoffzelle bei sehr hohen Temperaturen arbeitet, werden die Kraftstoffe innerhalb der Anode reformiert. Bei Festoxidbrennstoffzellen werden derzeit herkömmliche Tanktechnologien verwendet.

Mit Blick auf die Dekarbonisierung wird die Kraftstoffauswahl immer wichtiger. Demnach muss bei Festoxidbrennstoffzellen ein Wandel hin zu Kraftstoffen mit Netto-Null-Emissionen erfolgen und das Kraftstoffförder- und Reformersystem muss entsprechend angepasst werden.

1. Leichte, kostengünstige CFK-Wasserstofftanks → Kostengünstige, langlebige CFK-H2-Tanks für den Massenmarkt → Bessere Tankkonstruktion: Anpassung an Raum, neue Werkstoffe & Lebensdauer
2. Kryogene Speicherung & Speicherung von Flüssig-H2 → Zunehmende Speicherung von Flüssig- und Festkörperwasserstoff (z. B. Hydrid)
3. Auf mehrere Kraftstoffe ausgelegte SOFC → SOFC für CO_2-arme Mischkraftstoffe → SOFC für Kraftstoffe ohne Nettoemissionen

2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040

Kraftstoffspeicherung und -management

Bessere Kraftstoffördersysteme im Fahrzeug – sei es für Wasserstoff oder andere nachhaltige Kraftstoffe – werden dazu beitragen, die Leistung der Zellen zu steigern und die Anforderungen an das Balanc e-of-System zu senken.

Brennstoffzellenstack

Balance-of-System
- Thermosysteme
- Energie- und Nebenaggregat-management
- Lüftungssysteme und Fluid-Handling

Kraftstoff-speicherung und -management
- Speicherung und Kraftstoff
- Förderung

Kontrollsysteme

Ökobilanz

1 Wasserstoffförderung bei Polymerelektrolytbrennstoffzellen

Die Qualität des Wasserstoffs, der der Brennstoffzelle zugeführt wird, ist besonders wichtig, da die Stacks auf einen reinen Krafstoff angewiesen sind. Für die Reinigung, Zirkulation und Konditionierung des Kraftstoffs sind verschiedene Balance-of-Systeme verantwortlich, die die Effizienz der Energieumwandlung und die Kosten des Systems direkt beeinflussen. Eine bessere Qualität (d. h. Reinheit) des Wasserstoffs führt zu entsprechenden Verbesserungen bei Pumpen, Reglern, Anschlüssen, Ventilen und Düsen.

Auf lange Sicht werden Flüssig- und Festkörperwasserstoff dazu führen, dass es in Bezug auf die Reinigung, Konditionierung und Förderung von Wasserstoff zum Stack Änderungen geben wird.

2 Versorgung von Festoxidbrennstoffzellen mit verschiedenen Kraftstoffen

Kraftstoffördersysteme müssen in der Lage sein, Verunreinigungen zu entfernen und die Zelle effizient zu versorgen, andernfalls besteht die Gefahr, dass die Leistung und die Lebensdauer der Zelle beeinträchtigt werden.

Die direkte Erwärmung des Kraftstoffs auf die Betrieb stemperatur des Stacks verhindert die Bildung von Kohlenstoff, der den Stack ansonsten unbrauchbar machen würde.

Kleinere und effizientere Kraftstoffreformersysteme bieten einen zusätzlichen Nutzen, da sie den Energiebedarf des Balance-of-Systems und damit die Kosten reduzieren.

Auf lange Sicht müssen Kraftstoffördersysteme für Festoxidbrennstoffzellen auf nachhaltige Kraftstoffquellen umgestellt werden, um die Dekarbonisierung voranzutreiben.

1 Bessere H2-Qualität als Kraftstoff, Pumpen, Anschlüsse, Regler, Ventile und Düsen → Wasserstoffreinigung im Fahrzeug, Flüssigwasserstoffsysteme, Fördersysteme für Festkörperwasserstoff

2 Kleinere und effizientere Kraftstoffreformersysteme → An Kraftstoffe mit Netto-Null-Emissionen angepasste Fördersysteme

2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040

Kontrollsysteme

Der zunehmende Einsatz von Sensoren, der prädiktiven Regelung und komplexer modellbasierter Regelungen wird zu Verbesserungen in den Bereichen Effizienz, Haltbarkeit und Lebensdauer der Zellen führen, allerdings bedarf es einheitlicher Vorschriften, Kodizes und Normen zur Förderung der Kommerzialisierung.

Brennstoffzellenstack

Balance-of-System
- Thermosysteme
- Energie- und Nebenaggregat-management
- Lüftungssysteme und Fluid-Handling

Kraftstoff-speicherung und -management
- Speicherung und Kraftstoff
- Förderung

1 Modellprädiktive Regelung und KI

Ein intelligenteres Energie- und Nebenaggregatmanagement sorgt schon für Verbesserungen des Kraftstoffverbrauchs. Die On-Board-Diagnose (unterstützt durch Sensoren), prädiktive Regelungen (mit erweiterten Warnungen oder der Planung von Wartungsplänen) und komplexe modellbasierte Steuerungen (unter Berücksichtigung mehrerer Systemfaktoren) verbessern die Zelleffizienz und die Beständigkeit und sorgen für eine längere Lebensdauer.

Im Zuge der fortschreitenden KI-Technologie werden längerfristig verstärkt prädiktive und Maschinenlerntechnologien eingesetzt, um Entscheidungen zu treffen und die Leistung und Gesundheit von Stacks zu verbessern.Bevor diese Technologien jedoch in kommerziellen Anwendungen eingesetzt werden können, sind umfangreiche Entwicklungen und Sicherheitstests erforderlich.

2 Sensoren und Software für Leistung und Lebensdauer

Optische und chemische Sensoren halten schon jetzt Einzug in Brennstoffzellen und überwachen das Kraftstoffverhältnis und den Zustand des Zellwerkstoffs. Fortschritte in der Software ermöglichen eine bessere Datennutzung, um korrigierende Entscheidungen zu treffen. In Zukunft könnten vorausschauende Maßnahmen ergriffen werden, um die Lebensdauer von Zellen zu verlängern und Wartungspläne zu verbessern.

Steuerungssysteme für Elektrofahrzeuge werden zwar allmählich vereinheitlicht, allerdings fehlt es noch an einer Spezifikation für Brennstoffzellensysteme. Es gibt derzeit nur allgemeine Spezifikationen für Elektrofahrzeuge.

HarmonHy ist eine von der EU finanzierte Maßnahme zur gezielten Unterstützung mit dem Ziel, eine Bestandsaufnahme der weltweiten Tätigkeiten in Bezug auf die Erarbeitung von Vorschriften, Kodizes und Normen für Wasserstoff und Brennstoffzellen vorzunehmen. Es wurden bereits Defizite festgestellt, und es zeichnen sich mögliche Konflikte zwischen den Vorschriften, Kodizes und Normen ab. Obwohl diese Aspekte nach und nach angegangen werden, fordern die Hersteller, dass in diesem Bereich mehr getan wird, um die Kommerzialisierung von Brennstoffzellen zu fördern.

Kontrollsysteme
- 1 On-Board-Diagnose und modellprädiktive Regelung für mehr Effizienz, Beständigkeit und Lebensdauer → Selbstlernende KI-Steuerungen
- 2 Interne Sensoren und Software zur Verbesserung der Leistung und Lebensdauer → Genormte und einheitliche Kontrollsysteme für den Massenmarkt

Ökobilanz

2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040

Ökobilanz

Zentrale Komponenten von Brennstoffzellen, z. B. die Membranelektrodeneinheit, sind problematisch für die Umwelt und energieintensiv in der Herstellung. Da es immer mehr Brennstoffzellenfahrzeuge gibt, wird der Fokus stärker auf die Ökobilanz und auf neue energie- und ressourceneffiziente Ansätze gelegt, mit denen die Umweltauswirkungen auf ein Mindestmaß reduziert werden können.

Brennstoffzellenstack

Balance-of-System
- Thermosysteme
- Energie- und Nebenaggregat-management
- Lüftungssysteme und Fluid-Handling

Kraftstoff-speicherung und -management
- Speicherung und Kraftstoff
- Förderung

Kontrollsysteme

1 Werkstoffe, Verfahren und Ausrichtung auf Ökobilanz

Die Herstellung von Membranelektrodeneinheiten, einschließlich der Katalysatoren, ist sehr aufwendig und teuer und macht etwa 35–45 % der Systemkosten aus.

Die Membranelektrodeneinheit besteht aus Polymerelektrolytmembranen, Katalysator-schichten und Gasdiffusionsschichten. Im Automobilbereich werden die Membranen üblicherweise aus perfluorierter Sulfonsäure hergestellt, um Polymerketten zu bilden. Diese Verfahren sind sowohl ökologisch problematisch als auch sehr energieintensiv: Die Katalysatortinte wird üblicherweise in einem Düsenbeschichtungsverfahren auf die Membranen aufgebracht, sodass eine katalysatorbeschichtete Membran entsteht. Die Schichten werden bei ca. 130 °C und 200–350 kPa heiß gepresst. Daher ist es angezeigt, energieeffiziente Verfahren mit einem geringeren Einsatz von chemischen Stoffen in den Vordergrund zu rücken.

Langfristig braucht es eine geschlossene, kreislauforientierte Wertschöpfungskette für wichtige Stack-Werkstoffe wie CFK und Platin, damit effiziente und wirtschaftlich tragfähige Rückgewinnungsverfahren möglich werden. Je mehr Brennstoffzellen auf den Markt gebracht werden, desto stärker wird der Fokus auf die Ökobilanz gelegt werden, insbesondere auf Katalysatoren für Verbrennungsmotoren und Batteriemetalle.

2 Energieeffiziente Fertigung und Fertigungssysteme mit Netto-Null-Emissionen

Die in Fertigungsanlagen verbrauchte Energie ist mit einem entsprechenden CO2-Fußabdruck verbunden. Ein langfristiges Ziel für OEMs besteht darin, den Energieeinsatz in der Fertigung zu reduzieren und kontinuierlich Verbesserungen zu erzielen, um eine Fertigung mit Netto-Null-Emissionen zu erreichen.

Dazu gehören die Konstruktion und die Entwicklung von leicht demontierbaren Stacks und verbesserte Recyclingverfahren für den gesamten Lebenszyklus der Produkte (Wiege-zur-Bahre-Ansatz), aber auch eine Endlosschleife der Wiederverwertung (Cradle-to-Cradle-Prinzip).

Auf lange Sicht werden die gesamten Umweltauswirkungen der Lieferkette von Zellen und chemischen Stoffen noch mehr unter die Lupe genommen.Die Energieintensität der Fertigung von Membranelektrodeneinheiten, Bipolarplatten und Stacks, Umweltauswirkungen wie flüchtige organische Verbindungen und der Wasserverbrauch werden dabei auch berücksichtigt. Dies könnte die Kommerzialisierung neuer energie- und ressourceneffizienter Lösungen zur Herstellung von Brennstoffzellensystemen ankurbeln.

Ökobilanz

1 Umweltorientierte Verfahren, z. B. für die Herstellung von MEA und Katalysatoren → Effiziente Rückgewinnung hochwertiger Werkstoffe, z. B. Platin, CFK → Auf Ökobilanz ausgerichtete Wertschöpfungsketten

2 Entwicklung mit Blick auf Netto-Null-Emissionen und Demontage → Weitgehend CO_2-freie, energieeffiziente Herstellung und Recycling → Herstellungssysteme mit Netto-Null-Emissionen

2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040

Glossar

Abkürzung	Erläuterung
KI	Künstliche Intelligenz. Intelligente Maschinen und Algorithmen, die Aufgaben ausführen können, für die normalerweise menschliche Intelligenz erforderlich ist.
CFK	Kohlenstoffverstärkter Kunststoff.
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicles (Brennstoffzellenfahrzeuge).
GU FCH	Gemeinsames Unternehmen „Brennstoffzellen und Wasserstoff“. Ein europäisches öffentlich-privates Programm, mit dem Forschung, technologische Entwicklung und Demonstrationstätigkeiten unterstützt werden.
GDL	Gas Diffusion Layer (Gasdiffusionsschicht).
Ökobilanz	Bewertung der Lebenszyklen. Hierbei werden die Umweltauswirkungen über alle Phasen des Lebenszyklus eines Produkts hinweg erfasst (z. B. von der Rohstoffgewinnung über die Verarbeitung, Herstellung und Nutzung bis hin zum Recycling bzw. zur Entsorgung am Ende der Lebensdauer).
MEA	Membranelektrodeneinheit, bestehend aus Membranen (Beschichtungen, Gasdiffusionsschichten und Katalysatoren), Isolierung und Endplatten.
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell (Polymerelektrolytbrennstoffzelle).
PGM	Platinum Group Metalls (Platinmetalle).
RCS	Regulations, Codes and Standards (Vorschriften, Kodizes und Normen).
SOFC	Solid Oxid Fuel Cell (Festoxidbrennstoffzellen).
TBO	Time Between Overhaul (Durchschnittliche Dauer bis zur Überholung).
TCO	Total Cost of Ownership (Gesamtbetriebskosten).
VOC	Flüchtige organische Verbindungen sind verschiedene chemische Stoffe, von denen einige langfristige Auswirkungen auf die Gesundheit haben können.

Ein besonderer Dank geht an Spell Creative und Mindraft für die Unterstützung bei der Gestaltung und Ausarbeitung dieses Berichts sowie an BMG Research für die Durchführung der Umfrage unter Branchenexperten für den Fahrplan im Auftrag des APC und für die Unterstützung.