



## Aufbau und Funktion eines Brennstoffzellenantriebsstrangs

Der Antriebsstrang für FCEVs (Fuel Cell Electric Vehicles) ist vom grundlegenden Aufbau unabhängig von der Systemgröße und dem Anwendungsbereich, in dem das Fahrzeug zum Einsatz kommt. Lediglich einzelne Komponenten und die Anordnung dieser können sich in der Ausführungsart, Dimensionierung und dem Funktionsumfang unterscheiden. Bestandteil der ch2ance Factsheet-Reihe ist es, einen Überblick über den Brennstoffzellenantriebsstrang und dessen Subsysteme zu vermitteln.

### Inhalte

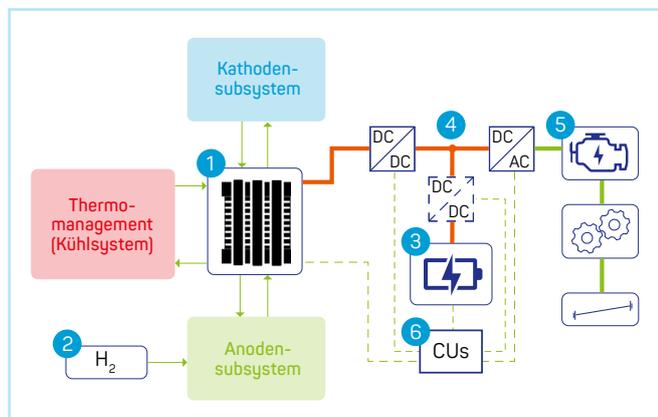
- ⊕ Überblick zum Aufbau und den Komponenten des Brennstoffzellenantriebsstrangs
- ⊕ Topologie eines Brennstoffzellenantriebsstrangs
- ⊕ Grundlagen der Hybridisierung des Antriebsstrangs
- ⊕ Hybrid-Energiemanagement des FCEVs
- ⊕ Äußere und innere Einflüsse sowie deren Wirkung auf das FCEV

### Überblick zum Aufbau und den Komponenten des Brennstoffzellenantriebsstrangs

Der Brennstoffzellenantriebsstrang umfasst alle erforderlichen Komponenten, um die chemische Energie der Eduktgase Wasserstoff und Sauerstoff in kinetische Energie für den Fahrzeugantrieb umzuwandeln. Dazu zählen:

- |  |   |
|--|---|
| 1. Brennstoffzellensystem:             | Wandlung der chemisch gebundenen Energie der Eduktgase in elektrische Energie   |
| 2. chemischer Energiespeicher:         | Speicherung von Wasserstoff in einem Drucktanksystem mit wahlweise 350 bar oder 700 bar absolut                                     |
| 3. elektrische Energiespeicher:        | Radantriebsleistung unterstützen (z. B. Lastspitzen abfangen, FC-Lastpunkt verschieben), rekuperierte Energie speichern             |
| 4. Leistungselektronik:                | elektrische Verbindung, Spannungsanpassung und Leistungsregelung von FC-Stapel, elektrischer Energiespeicher und E-Motor            |
| 5. Elektromotor:                       | Wandlung von elektrischer in kinetische Energie für den Radantrieb  |
| 6. Steuergeräte (CUs - Control Units): | Betrieb und Überwachung des FC-Systems, Energiemanagement zwischen Brennstoffzelle und Energiespeicher sowie Steuerung des E-Motors |

Weitere Informationen zum FCEV-Tanksystem finden Sie im Factsheet: **Wasserstofftanksystem eines FCEVs**



Flussschema eines Brennstoffzellenantriebsstrangs (Quelle: eigene Darstellung)



Weitere Informationen zu den Subsystemen finden Sie im Factsheet: **Aufbau und Funktion eines FC-Systems**

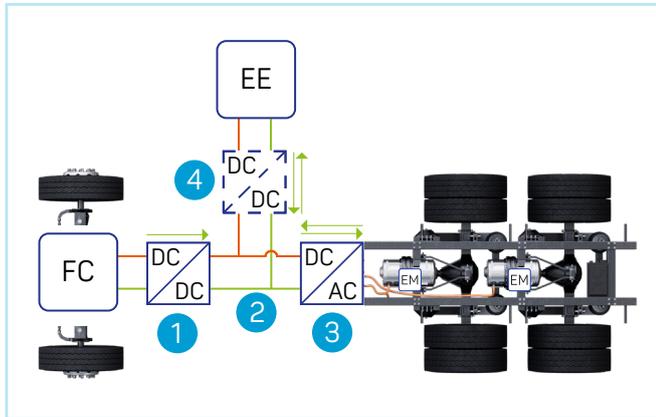
3D-Modell eines Brennstoffzellenantriebsstrangs (Quelle: eigene Darstellung)

Mehr Informationen zum Brennstoffzellenantriebsstrang, dessen Subsysteme und ein interaktives 3D-Demonstrationsmodell eines FCEV finden Sie im Wissensbereich unter [www.ch2ance.de](http://www.ch2ance.de).

## Topologie eines Brennstoffzellenantriebsstrangs

Die Topologie bezeichnet verschiedene Varianten, die Brennstoffzelle und einen oder mehrere elektrische Energiespeicher (EE) über Leistungselektronik mit dem Elektromotor zu verschalten. Der aktuelle Stand der Technik zeichnet sich durch niedrige Wandlungsverluste

und eine hohe Flexibilität im Energiemanagement aus. Abhängig vom Lastprofil und weiteren Randbedingungen kann die Bewertung der Topologievarianten unterschiedlich ausfallen.



Topologie eines seriellen Voll-Hybrids (Quelle: eigene Darstellung)

1. Ausgleich der variierenden Brennstoffzellenspannung zwischen Teil- und Volllast (Faktor 2), Verhinderung unkontrollierten Stromflusses zwischen elektrischem Energiespeicher (EE) und Brennstoffzelle <sup>[1]</sup>
2. Hochspannungszwischenkreis von bis zu mehreren hundert Volt <sup>[2]</sup>
3. Wandlung der Gleichspannung (DC) in Wechselspannung (AC) für den E-Motor (EM), Wandlung der rekuperierten Wechselspannung in Gleichspannung zum Laden des elektrischen Energiespeichers (EE) <sup>[1]</sup>
4. Anpassung des Spannungsniveaus des elektrischen Energiespeichers an den Hochspannungszwischenkreis <sup>[1]</sup>

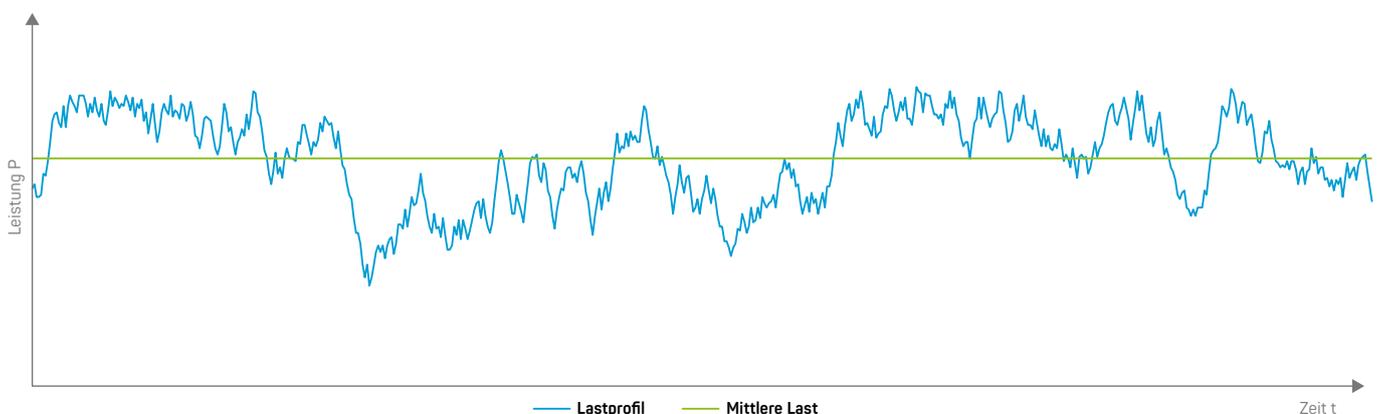
## Grundlagen der Hybridisierung des Antriebsstrangs

Der Brennstoffzellenhybridantrieb besteht aus einem Elektromotor kombiniert mit mindestens einem elektrischen Energiespeicher (z. B. Akku, SuperCap) und einem FC-System als Energiewandler. Die Versorgung der Reaktionsmedien erfolgt aus einem Wasserstofftankensystem und der Umgebungsluft. Die Dimensionierung des Brennstoffzellensystems, die Auswahl und Dimensionierung des elektrischen Energiespeichers sowie die Hybridstrategie sind vom vorliegenden Lastprofil und den Einsatzbedingungen abhängig, wobei die Brennstoffzelle vereinfachend dargestellt die mittlere Last abdeckt. Das Wasserstofftankensystem wird abhängig vom vorhandenen Bauraum und den Reichweitenanforderungen dimensioniert <sup>[2-4]</sup>. Auftretende Lastschwankungen können teilweise über die Nachführung des Arbeitspunktes durch die Brennstoffzelle abgefangen werden. Dabei wirken sich das Ansprechverhalten des Luftverdich-

ters und der H<sub>2</sub>-Rezirkulation, die Purge-Strategie, das Feuchte-management und die Wärmeabfuhr entscheidend auf die Dynamik, das Systemverhalten, die Leistung, den H<sub>2</sub>-Verbrauch und die Degradation der Brennstoffzelle aus.

Beispielhafte Faktoren, die das zu Grunde liegende Lastprofil beeinflussen können, sind:

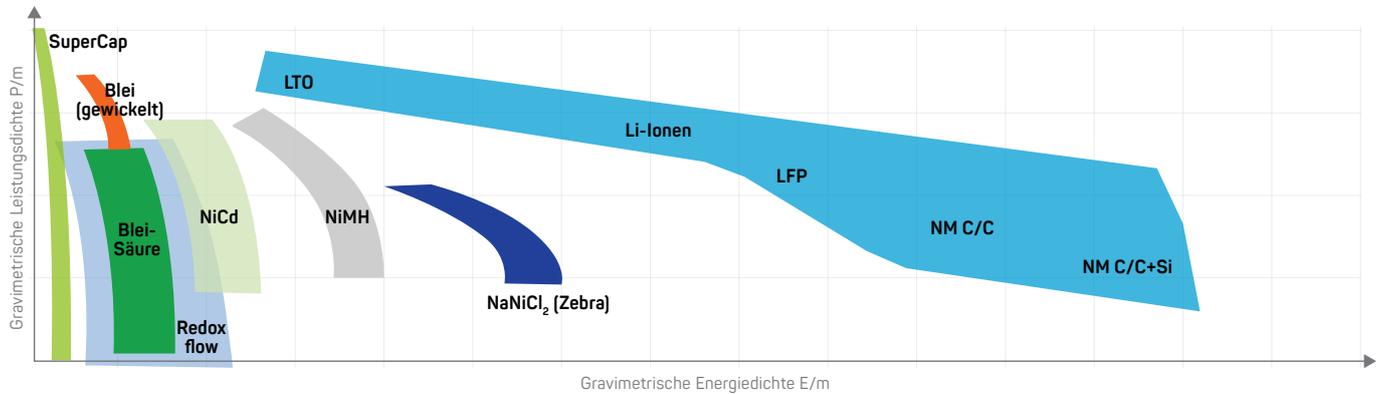
- ⊕ Fahrzeuggröße
- ⊕ Einsatzort
- ⊕ Arbeitsaufgabe



beispielhafter qualitativer Lastprofilverlauf (Quelle: eigene Darstellung)

Für absehbar kurzzeitige hohe Lasten eignen sich vor allem Super-Caps mit einer hohen Leistungsdichte. Sobald jedoch über einen längeren Zeitraum hohe Lasten zu erwarten sind, oder eine langfristige Speicherung der elektr. Energie vorteilhaft ist, eignen sich unter den

Akkumulatoren nach aktuellem Stand der Technik besonders die unterschiedlichen Ausführungen von Lithium-Ionen-Akkus mit einem ausgewogenen Verhältnis aus Leistungs- und Energiedichte.



Ragone-Diagramm von ausgewählten elektrischen Energiespeichern (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an H. Tschöke et al.<sup>[2]</sup>)

## Hybrid-Energiemanagement des FCEVs

Die Regelung des Energieflusses zwischen den Teilsystemen bei definierter Topologie bedarf einer Energiemanagementstrategie (EMS), da in der realen Anwendung nicht vorhersagbare Einflüsse wie z. B. das Streckenprofil und Umwelteinflüsse auf das System einwirken. Unterschiedliche Strategieansätze werden aufgrund der jeweiligen Komplexität folgend kurz mit Beispielen vorgestellt. Die Optimierung des Energiemanagements ist eine Aufgabe, welche von mehreren Zielgrößen abhängt, welche sich gegenseitig beeinflussen können.

Mögliche Ziele können sein:

- ⊕ Minimierung des Kraftstoffverbrauchs
- ⊕ Erhöhung der Lebensdauer
- ⊕ Effizienzerhöhung
- ⊕ Minimierung der Degradation

## Gegenüberstellung unterschiedlicher Energiemanagementstrategien

Kurzbeschreibung	Vorteile	Nachteile
Regelbasierte EMS <sup>[1,5]</sup>		
z. B. Ladungserhaltung (FC arbeitet in Abhängigkeit des Batterie SoC – State of Charge), gleitender Durchschnitt (FC arbeitet entsprechend dem mittleren Bedarf einer definierten zurückliegenden Zeiteinheit) und Fuzzy-Logik	<ul style="list-style-type: none"> <li>• einfach zu erstellen und implementieren</li> <li>• geringer Berechnungsaufwand (echtzeitfähig)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• optimale Lösung unbekannt</li> <li>• Erfahrungswerte erforderlich</li> <li>• hoher Applikationsaufwand möglich (Anpassung an Komponenten)</li> </ul>
Optimierungsbasierte EMS <sup>[1,5]</sup>		
Minimierung einer Kostenfunktion (zu einer Hauptanforderung mit Einflussfaktoren) zu einem momentanen Fahrzustand oder über einen bekannten Fahrzyklus	<ul style="list-style-type: none"> <li>• optimale Lösung zu bekannten Fahrzyklus bestimmbar</li> <li>• effiziente Lösung bei beliebiger Fahrsituation möglich</li> <li>• geringer Applikationsaufwand</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• hoher Berechnungsaufwand (bedingt echtzeitfähig)</li> </ul>
KI-basierte EMS <sup>[4,6]</sup>		
Maschinelles Lernen mit der Nutzung von z. B. neuronalen Netzwerken	<ul style="list-style-type: none"> <li>• sehr effiziente Lösung möglich, Selbsterlernereffekt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• hoher Berechnungsaufwand, komplex zu integrieren</li> </ul>

Unterschiedliche Methoden von Erfahrungswerten über Lookup-Tabellen, Suchheuristiken (Algorithmen in Anlehnung an Naturphänomene) bis hin zu neuronalen Netzwerken können zur Formulierung der EMS zum Einsatz kommen.

## Äußere und innere Einflüsse sowie deren Wirkung auf das FCEV

Je nach Einsatzgebiet und Herstellervorgaben wird eine Lebensdauer von 8.000 h für PKWs und bis zu 30.000 h für NFZs mit Brennstoffzellenantriebsstrang gefordert [7]. Dabei kann es durch von außen einwirkende Einflüsse und durch ungünstige Betriebszustände der Brennstoffzelle zur Degradation (Alterung) und somit zu einer Verringerung der Leistung und der Lebensdauer kommen.

Beispielhafte Einflüsse sind:

- ⊕ Extremtemperaturen (Hitze und Frost)
- ⊕ Partikel und Schadgase in der Ansaugluft
- ⊕ häufige und ausgeprägte Lastwechsel der FC

### Lebensdauereinflussfaktoren auf Brennstoffzellensysteme

Betriebszustand	Problemstellungen	Beispiele für Lösungsansätze
Hochfahren (Kaltstart)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einfrieren von Produktwasser in der GDL-, Katalysatorschicht und Membran [8]</li> <li>• Schädigung der Komponenten durch Ausdehnung (etwa 9 %) des gefrierenden Produktwassers [8]</li> <li>• verminderte Gaszufuhr möglich [9]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Betrieb mit hoher Stromdichte oder geringer Zellspannung, folglich geringem Wirkungsgrad und großer Wärmeentwicklung im Hochfahrprozess [9]</li> <li>• Heizelemente in der Gaszufuhr und im Thermomanagementsystem [9]</li> <li>• direkte Stackbeheizung über Bipolar- oder Endplatten [9]</li> </ul>
im Betrieb	<ul style="list-style-type: none"> <li>• erschwerte Wärmeabfuhr bei hohen Umgebungstemperaturen, da Temperaturunterschied <math>\Delta T</math> zwischen Kühlmittel und Umgebung bei FC niedriger als bei Verbrennungsmotoren (Betriebstemp. FC ca. 70-80 °C, ICE ca. 100-120 °C) [2, 9, 10]</li> <li>• Kurzschluss im FC-Stapel aufgrund zu hoher Kühlmediumleitfähigkeit durch Ionenauswaschung [11]</li> <li>• Verstopfungen der Gasdiffusionslage durch Partikel, Passivierung der Katalysatorschicht oder PEM-Membran durch spezifische Schadgase [12]</li> <li>• begünstigte Degradation durch häufige und ausgeprägte Lastwechsel der FC</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• große Wärmeübertragungsflächen und folglich baum-intensive Wärmeübertrager erforderlich zur Abfuhr der Wärmeenergie bei vergleichsweise niedrigerem <math>\Delta T</math> [9]</li> <li>• auf Kühlmedium abgestimmte Materialwahl und Verwendung von Ionentauscher [11]</li> <li>• auf Einsatzumgebung angepasstes Filtersystem mit Partikelfiltration und Schadgasadsorption [12]</li> <li>• Überarbeitung der Hybridisierung und Energiemanagementstrategie</li> </ul>
Herunterfahren (shut-down)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schädigung des Brennstoffzellensystems und des Stacks durch Frost aufgrund im System verbleibenden Produktwassers nach dem Herunterfahren [9]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fortbetrieb mit austrocknenden Effekten wie z.B. ein Trockenblasen mit geringer Feuchte und niedrigen Druck, entsprechend ausgelegtes Verdichterkennfeld [9]</li> </ul>



Sie möchten mehr erfahren?  
Besuchen Sie unseren Wissensbereich:  
[www.ch2ance.de/h2-wissen](http://www.ch2ance.de/h2-wissen)

Nutzen Sie auch unser interaktives 3D-Modell des Brennstoffzellen-Antriebsstrangs



#### Quellen

- [1] F. Weiß, Optimale Konzeptauslegung elektrifizierter Fahrzeugantriebsstränge. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018.
- [2] H. Tschöke, P. Gutzmer und T. Pfund, Elektrifizierung des Antriebsstrangs: Grundlagen-vom Mikro-Hybrid zum vollelektrischen Antrieb. Springer-Verlag, 2019.
- [3] M. Özбек, „Modeling, Simulation, and Concept Studies of a Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle Powertrain,“ 2010.
- [4] T. Rudolf, T. Schurmann, S. Schwab und S. Hohmann, „Toward Holistic Energy Management Strategies for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles in Heavy-Duty Applications,“ Proc. IEEE, Jg. 109, Nr. 6, S. 1094–1114, 2021, doi: 10.1109/JPROC.2021.3055136.
- [5] S. Hahn, Modellbasierte Betriebsstrategie für PEM-Brennstoffzellensysteme. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2023.
- [6] M. Yue, S. Jemei, R. Gouriveau und N. Zerhounia, „Review on health-conscious energy management strategies for fuel cell hybrid electric vehicles: Degradation models and strategies,“ International Journal of Hydrogen Energy, 2019.
- [7] J. Marcinkoski, R. Vijayagopal, J. Adams, B. James, J. Kopasz und R. Ahluwalia, „DOE Advanced Truck Technologies: Subsection of the Electrified Powertrain Roadmap Technical Targets for Hydrogen-Fueled Long-Haul Tractor-Trailer Trucks 10/31/2019,“ 2019.
- [8] A. A. Amamou, S. Kelouwani, L. Boulon und K. Agbossou, „A Comprehensive Review of Solutions and Strategies for Cold Start of Automotive Proton Exchange Membrane Fuel Cells,“ IEEE Access, Jg. 4, S. 4989–5002, 2016, doi: 10.1109/ACCESS.2016.2597058.
- [9] M. Hilgers, Alternative Powertrains and Extensions to the Conventional Powertrain. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2023.
- [10] S. Pischinger und U. Seiffert, Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021.
- [11] M. Doppelbauer, Grundlagen der Elektromobilität. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020.
- [12] C. Özyalcin, P. Mauermann, S. Dirkes, P. Thiele, S. Sterlepper und S. Pischinger, „Investigation of Filtration Phenomena of Air Pollutants on Cathode Air Filters for PEM Fuel Cells,“ Catalysts, Jg. 11, Nr. 11, S. 1339, 2021, doi: 10.3390/catal11111339.

Autoren: L. Volmering (ZBT GmbH), M. Hentschel (HZwo e.V.)

Herausgeber: Transformations-Hub ch2ance; 2. Auflage 07/2025



Inhaltlicher Ansprechpartner:  
ZBT - Zentrum für Brennstoffzellen-Technik GmbH  
Carl-Benz-Straße 201, 47057 Duisburg, +49 20375982470



Gefördert durch:  
 Bundesministerium für Wirtschaft und Energie  
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages