



Alles über Brennstoffzellen ○ Energiezukunft

Brennstoffzellenfahrzeuge sind in der Lage, unsere globalen Umweltprobleme infolge unserer wachsenden Energie- und Mobilitätsbedürfnisse einen großen Schritt weit in den Griff zu bekommen. Leider sind es häufig nur Konzeptfahrzeuge oder Versuchsanlagen, die mit Brennstoffzellen arbeiten. Einige Hersteller wie Toyota oder Hyundai stellen bereits erste



Bildquelle: pixabay.com (Coradia iLint, Wasserstoffzug mit Brennstoffzelle [Fahrgastbeförderungen seit 2018])

Brennstoffzellen- bzw. Brennstoffzellen-Hybridfahrzeuge als **PKW** in Serie her. Einige Hersteller konzentrieren sich mehr auf **LKW**, **Busse** sowie **Schienenfahrzeuge**, wo sie die Zukunft der Brennstoffzellen (z.B. Infolge der Größe der Wasserstofftanks) eher sehen. Vor allem einige Busflotten sind bereits im Einsatz.

Regenerative Energiequellen wie u.a. die Solarenergie, Wasserkraft [inklusive Gezeitenkraft], Windkraft, Geothermie, Bioenergie [aus Biomasse bzw. Energiepflanzen] bilden die Grundlage für eine **umweltfreundliche Wasserstoffherstellung** und damit für die Brennstoffzelle. Kritisch ist allerdings zu bemerken, dass heute **Wasserstoff** dafür leider häufig **aus Erdgas** gewonnen wird, anstatt aus Wasser. Letzteres ist wesentlich aufwändiger und uneffektiver. Außerdem ist die Produktion der Fahrzeuge oft nicht unbedingt umweltfreundlich [z.B. CO₂-Emissionen, Rohstoffbedarf]. Darüber hinaus gibt es in Deutschland noch zu wenige Wasserstofftankstellen. Andererseits gibt es bereits Projekte, wo Brennstoffzellenfahrzeuge ohne Wasserstofftanks auskommen und beispielsweise mit flüssigem Methanol problemlos betankt werden.

Alles über Brennstoffzellen ○ Geschichtliches

Das Prinzip der Brennstoffzelle wurde bereits **1839** vom Baseler Professor **Schoenbein** und dem Engländer **Grove** entdeckt. Zum Einsatz kam es jedoch erst rund 100 Jahre später in der **Raumfahrttechnik** und als Antrieb von **U-Booten**. Die technisch brauchbare Brennstoffzelle wurde Anfang der 1960er Jahre beim amerikanischen Konzern General Electric entwickelt. Von da an spielten sie bereits in der Raumfahrt eine Rolle. Schon seit über 20 Jahren forscht man am Brennstoffzellen-Antrieb für Kraftfahrzeuge, die auf Wasserstoffbasis fahren. Beispielgebend waren u.a. ab 1991 die NECAR-Fahrzeuge von Mercedes-Benz. Auch andere Firmen wie z.B. Toyota, Honda, General Motors, Opel oder BMW entwickeln inzwischen Fahrzeuge. Derzeit gibt es einige MAN-Busse mit Brennstoffzellen, die z.B. in Berlin in Betrieb sind.

Daimler-Chrysler entwickelte die durch Brennstoffzellen betriebenen New Electrical Cars [**NECAR**] sowohl als Großraumlimousine sowie als PKW [NECAR4]. Ein NECAR2-Transporter hatte eine Höchstgeschwindigkeit von 110 km/h, 150 Brennstoffzellen im Heck sowie einen großen **Wasserstoff-Drucktank** im Dachgepäckträger und bot 6 Personen Platz. PKW mit Brennstoffzellen arbeiten häufig auf **Methanolbasis**. Das erspart die schweren und Platz raubenden Drucktanks für Wasserstoff.

2014 wurde der **Toyota Mirai** (jap., Zukunft) vorgestellt, der das erste serienmäßig produzierte Brennstoffzellenfahrzeug ist. Wasserstoff ist in zwei Tanks gespeichert. Der Elektromotor hat 155 PS. Er hat eine Reichweite von 500 km und beschleunigt von 0 auf 100 km/h in 9,6 Sekunden. (Bilder siehe auch https://de.wikipedia.org/wiki/Toyota_Mirai). Seit Ende 2019 wird die 2. Generation des Fahrzeugs mit 182 PS produziert. Pro Jahr werden in Deutschland leider nur etwa 50-60 Fahrzeuge zugelassen (in den USA mehr als tausend). Daneben sind auch der **Hyundai Nexa** und der **Honda Clarity Fuel Cell** (bis 2016 Honda FCX) seit 2018 bzw. 2016 bei uns erhältlich. Von 2018 bis 2020 wurden beispielsweise in Deutschland immerhin knapp 400 Hyundai Nero (163 PS) neu zugelassen. (Quelle: wikipedia.de)



Alles über Brennstoffzellen ○ Elektroauto contra Brennstoffzelle

Bereits 1899 gab es ein **Elektroauto**, das eine Spitzengeschwindigkeit von 100 km/h erreichte. Über 110 Jahre Technik und immer noch kein Durchbruch? Wie kann man endlich die Schadstoffbelastung mindern oder ganz abschaffen und so unsere Umwelt entlasten? Neue Antriebskonzepte haben eben noch zu hohe Anschaffungskosten, ein Netz z.B. von Elektro- oder Wasserstofftankstellen gibt es nur unzureichend und die Fahrleistungen sind nicht ganz so optimal. Jedenfalls gibt es sie schon in Serie, wenn auch leider zu teuer [und so kauft sie kaum jemand bzw. nur betuchte Kundschaft]. Autos mit Elektromotoren, die durch Akkumulatoren betrieben werden, arbeiten völlig abgasfrei. Eine Akkuladung reicht für ca. 200 km, teilweise auch mehr. Nachteilig sind allerdings die meist hohe Ladezeit und die häufig relativ geringe Reichweite. Außerdem stammt der Strom für das Aufladen meist aus einem Energiemix und nicht aus rein ökologischer Erzeugung. Trotzdem sind schon viele Serienfahrzeuge erwerbbar (und besonders im Stadtverkehr eine geeignete Alternative). Zum Aufladen muss das Fahrzeug immer an die Steckdose [und kann so währenddessen nicht benutzt werden]. Damit es schneller geht, braucht man an eine Schnellladestation. **Ein Brennstoffzellen-Auto hingegen ist stets mobil.** Leider ist die Herstellung von Akkus und Autos stark umweltbelastend, rohstoff- und energieaufwändig.

Alles über Brennstoffzellen ○ Grundsätzliches

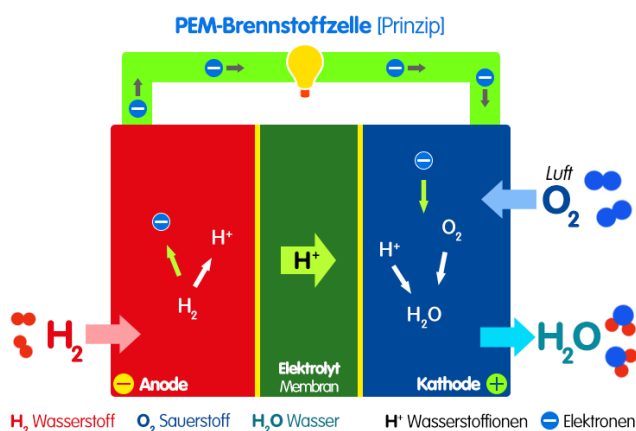
Normalerweise findet zwischen **Wasserstoff** und **Sauerstoff** eine Knallgasreaktion [Explosion] statt; durch eine trennende **Membran** wird dies verhindert. Diese Elektrolyt-Membran dient dazu, die elektrochemische Reaktion von Brennstoff und Luft zu kontrollieren – durch **Ladungstrennung** entsteht dann eine **elektrische Spannung** [Elektronenwanderung].

Die Leistung eines modernen Brennstoffzellensystems bis zu **250 kW** bei einem Wirkungsgrad von bis zu 60% je nach Typ. *Zum Vergleich: Wirkungsgrad eines Otto-Motors beträgt nur etwa max. 20% bei 100 kW Leistung; ein modernes Kohlekraftwerk arbeitet mit einem Wirkungsgrad von ca. 35%.*

Alles über Brennstoffzellen ○ PEM-Brennstoffzellen

Diese Brennstoffzelle besteht aus Anode, Kathode [mit Katalysatoren wie Platin beschichtete poröse Flächen wie z.B. Metallplatten] und Elektrolyt-Membran [letzte muss man sich in etwa wie eine Folie vorstellen]. Statt Membranen lassen sich auch andere Elektrolyte wie Säuren oder Laugen nutzen. **PEMFC** [Proton Exchange Membrane Fuel Cell] ist die Abkürzung für Brennstoffzellen mit semipermeabler [halbdurchlässiger] Membran.

Prinzip → Eine einfache PEM-Brennstoffzelle benötigt Wasserstoff und Luftsauerstoff. Wasserstoff ist sozusagen der Brennstoff. An der Anode werden Wasserstoffmoleküle in Wasserstoffionen und freie Elektronen gespalten. Mit Hilfe der Elektronen werden aus Sauerstoffmolekülen an der Kathode Oxidionen, die dann mit den Wasserstoffionen von der Anode [können die Membran passieren] Wasser bilden. Daher entsteht zwischen Anode und Kathode ein Stromfluss [Gleichstrom]. Die PEM-Brennstoffzelle arbeitet bei etwa 80°C und liefert ein relativ kaltes Abgas ohne schädliches Treibhausgas CO₂.
[messbare Spannung je Zelle: 1,23 V]



Mit dem Strom aus der Brennstoffzelle werden ein oder mehrere **Elektromotoren** angetrieben sowie auch Akkus aufgeladen.



Alles über Brennstoffzellen ○ PEM-Brennstoffzellen-Stack

Brennstoffzellen-Stack → Die Reihenschaltung vieler Brennstoffzellen liefert die entsprechend benötigte elektrische Energie. Elektroden [Anode, Kathode] und Membran sind dabei fest verpresst. Die einzelnen Brennstoffzellen werden durch Platten mit Rillen voneinander getrennt. In den Rillen werden die Gase H_2 bzw. Luft- O_2 oder Wasserdampf geleitet.



Oxidation an der Anode [-] $\triangleright 2 H_2 \rightarrow 4 H^+ + 4 e^-$

Reduktion an der Kathode [+] $\triangleright 2 O_2 + 4 H^+ + 4 e^- \rightarrow 2 H_2O$

Gesamtreaktion [Redoxreaktion] $\triangleright 2 H_2 + O_2 \rightarrow 2 H_2O$

innerer Ladungstransport $\triangleright$ mittels Wasserstoffionen H^+ [eigentlich Oxoniumionen H_3O^+]

Alles über Brennstoffzellen ○ Einsatzgebiete

- **mobile Wasserstoff-Anwendungen** → Kraftfahrzeuge, Raketen bzw. Raumfähren, Satelliten und Raumstationen, in der Schifffahrt, Ladegeräte für Akkus [z.B. für Handys, Laptops]
- **Mini-Brennstoffzellen** → direkt verbaut in Radios, Lampen, Notebooks, Handys, Tablet-PC's gibt es bereits
- Grundprinzip des **Fahrzeugantriebes** → Fahrzeuge mit Brennstoffzelle werden mit Wasserstoff betankt; die Brennstoffzellen erzeugen mobil elektrischen Strom, der dann Elektromotoren antreibt. *(Alternativ gibt es andere Brennstoffzellen-Konzepte, die nicht mit reinem Wasserstoff betankt werden müssen, sondern z.B. mit Methanol.)*

Alles über Brennstoffzellen ○ Pro und Contra

VORTEILE	NACHTEILE
Kopplung von Brennstoffzellen und Fotovoltaik, d.h. Erzeugung von Wasserstoff durch Elektrolyse von Wasser mittels Solarzellen, dann Stromerzeugung mittels Brennstoffzelle, die den Wasserstoff nutzt [nur die <u>Wasserstoffgewinnung aus regenerativen Energieträgern</u> macht ökologisch Sinn und entlastet die Umwelt] Brennstoffzellen sind mobil - somit ist man zum Aufladen von Akkus netzunabhängig umweltfreundlich [es entsteht nur Wasser] hoher Wirkungsgrad, viel Leistung hohe Mobilität ohne Aufladezeiten [ohne Standzeiten]	direkt mit Wasserstoff betriebene Brennstoffzellen erfordern schwere Druck-gastanks [Materialaufwand, Energieaufwand für Komprimierung, schweres Fahrzeug] Wasserstoff muss nicht unbedingt aus regenerativen Energiequellen stammen (Umweltaspekt negativ) Umgebungstemperatur [derzeit] bis zu -20°C möglich, da unterhalb des Gefrierpunktes des Wassers das Kalt-Starten der Brennstoffzelle problematischer wird hohe Produktionskosten [für Brennstoffzellen sowie Fahrzeuge] teilweise hochwertige und hochpreisige Materialien Wasserstoff-Tankstellen sind noch selten <u>Elektrolyte</u> wie Phosphorsäure oder Kalilauge sind stark ätzend; Methanol ist sehr giftig [die Stoffe gelangen aber nicht in die Umwelt, sondern sind nur bei Herstellung, Wartung bzw. Betankung mit Vorsicht zu genießen - es gibt eigentlich keine schädlichen Abgase]



Alles über Brennstoffzellen ○ Weitere Brennstoffzellen-Konzepte

Man kann statt Wasserstoff auch andere Stoffe mitführen, z.B. Metallhydride oder Methanol.

Wasserstoff wird daraus mobil erst erzeugt. Diese Stoffe benötigen auch weniger Druck.

- **alkalische Brennstoffzelle** [AFC] → Elektrolyt: Kalilauge; mobiles Ion ist das Hydroxidion OH^- [nicht Wasserstoffionen]; Arbeitstemperatur 80°C ; benötigt reinen Sauerstoff [statt Luft]
- **Polymerelektrolyt-Brennstoffzelle** [PEMFC] → Elektrolyt: Polymer-Membran; mobiles Ion ist das Wasserstoffion H^+ ; Arbeitstemperatur bis zu 100°C
- **Direktmethanol-Brennstoffzelle** [DMFC] → statt Wasserstoff nutzt man hier den Brennstoff Methanol [Anode]; Arbeitstemperatur bis zu 130°C
- **Ameisensäure-Brennstoffzelle** → statt Wasserstoff nutzt man hier den Brennstoff Ameisensäure [Methansäure]; Arbeitstemperatur nur bei $30-40^\circ\text{C}$
- **Phosphorsäure-Brennstoffzelle** [PAFC] → Elektrolyt: Phosphorsäure; Brennstoff ist Wasserstoff; Arbeitstemperatur bis zu 200°C

Es gibt noch diverse andere Typen.

Quellen: wikipedia.de, hyundai.de/modelle/nexo/, toyota.de/automobile/mirai/mirai-2020, schuelerlexikon.de