

Die Brennstoffzellenmodule für Fahrzeuge sind dank intensiver Forschung und Entwicklung leistungsfähiger, kostengünstiger und kleiner geworden. Den Durchbruch in der Pkw-Welt erwarten Experten allerdings erst in zehn Jahren. Bei den Nutzfahrzeugen nimmt die Schweiz eine Pionierrolle ein und sorgt für einen FC-Boom. Bild Hyundai

Brennstoffzellentechnik

E-Antrieb mit nur fünf Minuten Ladezeit

Die Brennstoffzellentechnologie ist uralte: Von der Energieversorgung im Weltall bis zum U-Boot reicht die Anwendungspalette. Auch im Fahrzeug wird seit über 25 Jahren an Fuel Cells (FC) geforscht und entwickelt. Der Durchbruch will aus verschiedenen Gründen noch nicht gelingen. Dabei ist die Brennstoffzellentechnik eine ernst zu nehmende Alternative zu den BEV. Wir decken Vor- und Nachteile der FC-Technologie auf. **Andreas Senger**

Eine Brennstoffzelle lässt Wasserstoff H_2 und Sauerstoff O_2 zu Wasser H_2O reagieren. Dabei wandern Protonen von der Wasserstoffseite durch eine dünne Membran zur Luftsauerstoffseite. Diese Protonenwanderung erzeugt Elektrizität. Bei Prozesstemperaturen von 400 bis 1000°C in keramischen FC ist der Wirkungsgrad sehr hoch. Im Fahrzeug lassen sich diese Art von FC nicht einsetzen.

In Fahrzeugen kommen PEMs zum Einsatz (Proton Exchange Membran), welche bei Arbeitstemperaturen um 60°C betrieben werden. Dieses Verfahren wird auch als «kalte» Verbrennung bezeichnet. Pro Quadratzentimeter Membranfläche wird eine

elektrische Leistung von rund einem Watt erzeugt. Das Edelmetall Platin unterstützt die chemischen Vorgänge als Katalysator. Der Anteil des teuren Edelmetalls konnte dank intensiver Forschung markant verringert werden (Reduktion um Faktor 10).

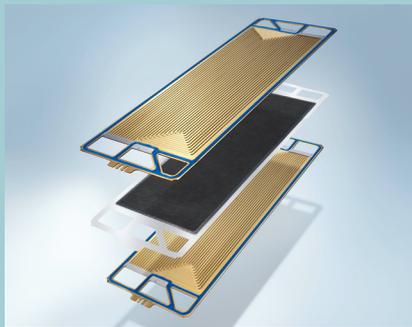
Um eine fürs Fahrzeug benötigte hohe Spannung zu realisieren, werden die einzelnen FC-Zellen in Reihe zu einem Stack geschaltet. Im aktuellen Toyota Mirai sind beispielsweise 370 Zellen seriell verbunden. Eine Zelle weist eine Spannung von 0,85 V auf, was insgesamt bei maximaler Leistung eine FC-Spannung von 315 V ergibt. Die Dauerleistung beträgt 75 kW. Bei maximaler

Energieumwandlung sind kurzzeitig 110 kW elektrische Leistung realisierbar.

Der Wirkungsgrad ist bei geringer Abruflast am höchsten: Mehr als 65% Umwandlungseffizienz wird bei rund einem Drittel Belastung/Leistung erreicht. Bei maximaler Energieumwandlung sinkt der Wirkungsgrad erheblich ab (auf rund 40%). Als Speicher verwendet Toyota im Gegensatz zu den Mitbewerbern einen Nickel-Metallhydrid-Akku mit 1,6 kWh Energiespeichervermögen (245 V). Das Fahrzeug wiegt leer knapp 1,9 Tonnen und weist einen Normverbrauch von 0,76 kg H_2 /100 km auf.

Aus Wasserstoff wird Strom und Wasser

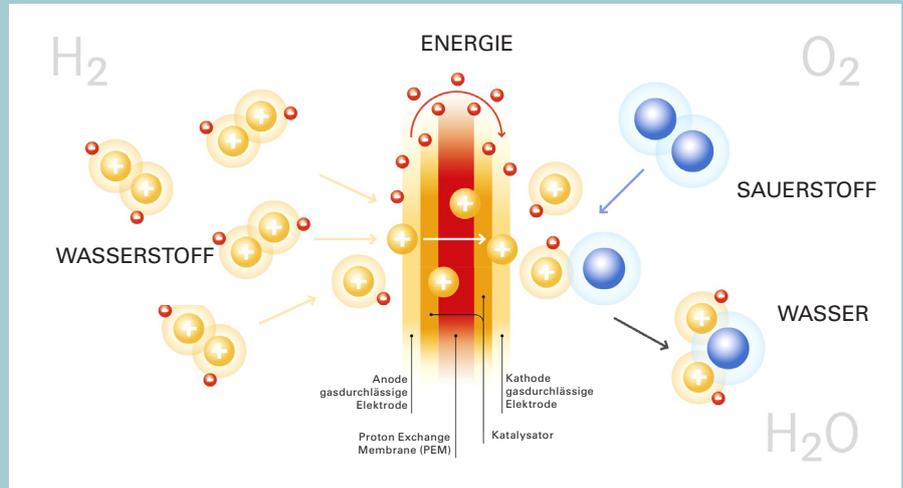
Die Brennstoffzellentechnik ist von der Grundfunktion her simpel: Durch Zuführen von Wasserstoff H_2 an die PEM (Protonendurchlässige Membrane) werden die Elektronen an der Anode vom Atomrumpf getrennt. Es entsteht eine Ionenwanderung durch die PEM. Am Katalysator mit Platinanteil reagieren die Wasserstoffionen mit dem zugeführten Luftsauerstoff O_2 zu Wasserdampf H_2O , der kondensiert zu Wassertropfen. Die technischen Herausforderungen sind die exakte Zuführung des mit 700 bar mitgeführten Wasserstoffs durch Begasung der PEM (Druck vor PEM zwischen rund 1 bis 2 bar) und die proportionale Luftmenge (mittels Verdichter und Luftbefeuchter), um die kalte Verbrennung stattfinden zu lassen.



Die Produktion der FC ist nach wie vor sehr aufwendig und geschieht von Hand in Reinräumen. Entsprechend sind die Stacks, also die kompletten FC-Aggregate inkl. Dosierung, Kühlung, Beheizung und Regelungstechnik, aktuell sehr teuer.

Insbesondere das transiente Verhalten in Fahrzeugen (Beschleunigen) stellt eine regelungstechnische Herausforderung dar. Die Leistungselektronik lässt deshalb die Energie der FC und des eingebauten Akkus zusammenfließen, um bei hoher Leistungsanforderung die E-Antriebsmotoren zu versorgen. Weitere technische Knackpunkte sind zudem die Temperaturregelung: Optimal

arbeiten PEM-FC in einem Temperaturfenster von 60 bis 80 °C. Deshalb muss die PEM mittels PTC-Zuheizung elektrisch beheizt und via Fahrzeugkühlsystem gekühlt werden. Insbesondere bei tiefen Aussentemperaturen verschlingt die Beheizung des FC-Aggregats wie beim BEV viel Energie, da auch die Akkus beheizt werden müssen.



Das Grundprinzip ist bestehend: Wasserstoff auf der linken Seite diffundiert durch die Protonenmembrane und spaltet dabei Elektronen ab. Es entsteht eine Spannung und damit elektrische Energie. Auf der rechten Seite des FC-Stacks entsteht durch eine kalte Oxidation aus dem zugeführten Luftsauerstoff Wasser. Bilder Mercedes-Benz

Die FC versorgen die Antriebs Elektromotoren nicht direkt, sondern wegen diesem Wirkungsgradabfall über einen Pufferakkumulator. Damit kann die FC wenn immer möglich im Bereich des maximalen Wirkungsgrads betrieben werden. Die Ausgangsspannung wird dann teilweise noch via DC/DC-Wandler auf die Spannung der Hochvoltbatterie transferiert. Beim Fahren können die E-Motoren die elektrische Leistung via Leistungselektronik parallel aus der Batterie und der FC beziehen. Die FC ist in ihrer Funktionalität ein Range-Extender und damit vom Grundprinzip her ein serieller Hybrid.

Bei Mercedes-Benz weist der GLC F-Cell, der aktuell nur an ausgewählte Kunden in Deutschland verleast wird, eine Brutto-Akkukapazität von 13,5 kWh auf, was eine Reichweite ohne FC von rund 40 km im praxisnahen WLTP-Zyklus entspricht. Das Fahrzeug verfügt über ein On-Board-Ladegerät mit 7,4 kW, um via Stecker den Akku an der Steckdose aufzuladen. Er verfügt über 160 kW Antriebsleistung, hat einen Verbrauch von 1 kg H_2 auf 100 km Distanz und wiegt leer 2,13 Tonnen.

Wie der Toyota Mirai (ab 89.900 Franken) kann auch der Hyundai Nexo in der Schweiz (ab

ENERGIEEFFIZIENZ – ANTRIEBE IM VERGLEICH

Batteriebetriebenes Elektroauto (BEV)

Erneuerbarer Strom 100 %
Übertragung (95%)
Batterie Laden / Entladen (90%)
Elektromotor (85%)
Mechanik (95%)

Gesamtwirkungsgrad
69%



Brennstoffzellen-Elektroauto (FCEV)

Erneuerbarer Strom 100 %
Übertragung (95%)
Elektrolyse (70%)
Wasserstoff (H_2) 67%
Kompression / Transport (80%)
Brennstoffzelle (60%)

Strom 32 %
Elektromotor (85%)
Mechanik (95%)

Gesamtwirkungsgrad
28%



Einsatz strombasierter Kraftstoffe (e-fuels)

Erneuerbarer Strom 100 %
Übertragung (95%)
Elektrolyse (70%)
Wasserstoff (H_2) 67%
Power to Liquid (70%)
Ferntransport (95%)

Flüssigkraftstoff 44%
Verbrennungsmotor (30%)
Mechanik (95%)

Gesamtwirkungsgrad
13%



Die Wirkungsgradbetrachtung von der Quelle bis zum Rad: Wenn es gelingt, den Wirkungsgrad der Elektrolyse (Produktion H_2) und der Brennstoffzelle zu optimieren, steigt der Gesamtwirkungsgrad. Nicht in der Betrachtung: die CO_2 -Thematik. Bild Nationale Plattform Zukunft der Mobilität.

89.000 Franken) erworben werden. Beide Fahrzeuge sind keine Steckerfahrzeuge und können somit nicht via Steckdose aufgeladen werden. Der Nexo weist eine FC mit 95 kW Leistung auf, besitzt einen 1,56 kWh-Akku (40 kW), einen E-Antrieb mit 120 kW maximaler Leistung und eine Reichweite von 666 km gemäss WLTP (bei knapp 2 Tonnen Leergewicht). Sein H_2 -

Verbrauch beträgt 0,8 kg/100 km. Dieses Jahr wird bereits die zweite Generation des Mirai in den Verkauf gelangen.

Eine weitere Herausforderung ist das sichere Mitführen des Treibstoffes H_2 . Auch diese Hürde wurde von den Forschern, Zulieferern und OEM genommen. Die drei Tanks des

Nexo mit 156,6 l Gesamtvolumen (6,33 kg H₂), der GLC F-Cell von Mercedes mit 4,4 kg H₂ (zwei Tanks) an Bord und der Toyota Mirai mit maximal 5 kg H₂ in zwei Tanks sind crash-sicher im Fahrzeug untergebracht und aufgrund der Konstruktion zerstörungsfrei.

Die Betankung ist weltweit einheitlich geregelt (siehe Interview mit Christian Bach). Die Elektrolyse vor Ort, wie in Deutschland an den bisherigen rund 70 Tankstellen oft praktiziert, ist aufgrund der dezentralen, kleinen Elektrolyseure energetisch nicht sinnvoll und aufgrund der Netzgebühren auch teuer. Die zentrale Wasserstoffherzeugung direkt bei einem regenerativen Stromlieferanten (beispielsweise Flusskraftwerk) ist effizienter, dafür ist der Transport des gasförmigen H₂ zu den Tankstellen aber auf-

wendig. Dass aktuell nur zwei Tankstellen öffentlich zugänglich sind, wird sich dieses Jahr dank H₂Energy rasch ändern: Im Jahr 2020 kommen sechs weitere dazu und rund 70 weitere sind in Planung.

Wird zudem die Gesamtwirkungskette betrachtet, schneidet H₂ wie auch synthetischer Treibstoff nicht wesentlich besser als verbrennungsmotorische Fahrzeuge ab. Der Wirkungsgrad der Elektrolyse beträgt aktuell 70%. Verdichtung, Transport und Vorkühlung des H₂ mit 80% und FC-Wirkungsgrad mit 50 bis 60% sorgen aufgrund der Multiplikation der Einzelwirkungsgrade für eine Systemkette mit niedrigem Wirkungsgrad. Trotzdem kann der Gesamtenergiesystem-Wirkungsgrad dank Wasserstoffnutzung steigen, weil damit Überschüssige

Elektrizität genutzt werden kann, die ansonsten hätte abgeregelt werden müssen.

Die CO₂-Bilanz bei Verwendung von regenerativem Strom ist für die FC-Technologie ähnlich gut wie bei BEV. Dies könnte dem FC-Antrieb in Zukunft zum Durchbruch verhelfen. <



Die Betankung von FC-Fahrzeugen ist für Kunden einfach: Der gasförmige Wasserstoff strömt innert fünf Minuten in die 700-bar-Tanks. Bild Hyundai

Interview mit Christian Bach, Abteilungsleiter Fahrzeugantriebssysteme Empa

Herausforderung H₂-Tankstelleninfrastruktur

Die FC-Technologie wird erst erfolgreich sein, wenn die Tankstelleninfrastruktur flächendeckend vorhanden ist und die elektrische Energie aus regenerativer Quelle stammt. Christian Bach beschäftigt sich auch mit Fragen rund um die Betankung mit Wasserstoff.

Herr Bach, welche technischen Herausforderungen sehen Sie für die Feinverteilung des Wasserstoffes für eine flächendeckende Fahrzeugmobilität?

Christian Bach: Wasserstofftankstellen weisen hohe Investitionskosten auf. Deshalb brauchen Tankstellen von Anfang an einen hohen Umsatz. Die in der Schweiz von H₂Energy und dem H₂-Förderverein gewählte Fokussierung auf LKW-Anwendungen bei gleichzeitiger Auslegung der Tankstellen auch für Personenwagen ist ein sehr gut durchdachter Ansatz. Die Anlagen für beide Personenwagen und LKW-Anwendungen kostenoptimal auszulegen, ist allerdings nicht einfach.

Die Betankungszeit ist ein grosser Vorteil gegenüber BEV-Ladezeiten. Welche Herausforderungen stellen sich für Tankstellenbetreiber, um den gasförmigen Wasserstoff rasch in die Fahrzeugtanks pumpen zu können?

Die Betankung eines H₂-Tanks in einem Fahrzeug von zum Beispiel 100 auf 700 bar erhöht die Temperatur im Tank aufgrund der Ver-

dichtung des Wasserstoffs um circa 100°C. Die kohlefaserumwickelten Tanks sollten aber aus Alterungsgründen keinen Temperaturen über 85°C ausgesetzt werden. Deshalb wird der Wasserstoff vor der Betankung auf -40°C vorgekühlt. Die ganze Betankungskette von Anlieferung, Zwischenspeicherung, Verdichtung, Vorkühlung bis Betankung ist technisch relativ aufwendig und braucht einiges an Platz.

Die Wirkungsgradthematik spricht gegen die Wasserstofftechnologie und FC-Systeme. Kommt diese Technologie trotzdem?

Ein grosser Vorteil von Wasserstoff ist die Entkopplung des Elektrizitätsbezugs für die Herstellung von Wasserstoff von der Betankung. Das bedeutet, dass der Wasserstoff nicht dann, wenn ein Fahrzeug betankt wird, hergestellt werden muss, sondern dann, wenn Stromüberschüsse vorhanden sind. Fachleute sprechen diesbezüglich oft von «Flexibilität». Ohne Wasserstoffherstellung müssten Stromüberschüsse abgeregelt werden. Wasserstoff kann deshalb – trotz niedrigem Teilsystem-Wirkungsgraden – den Wirkungsgrad des Gesamtenergiesystems erhöhen.

In welchen Mobilitätsbereichen ist der FC-Antrieb sinnvoll und wie viel Potenzial steckt in der Technik?

Wir gehen davon aus, dass Brennstoffzellenfahrzeuge im Personenwagenbereich vorwiegend in grösseren Fahrzeugen für den Langstreckeneinsatz, bei Nutzfahrzeugen im Regionalverkehr und in Bussen eingesetzt werden. Denkbar ist aber auch der Einsatz in Schnellladesäulen für Elektrofahrzeuge. Die Technologie ist noch nicht ausgereizt. Am PSI beispielsweise wird an einer innovativen Verdampfungskühlung für Brennstoffzellen gearbeitet, die die Komplexität von FC-Systemen deutlich verringern könnte. <



Christian Bach, Abteilungsleiter Antriebssysteme, Empa.