

# Elektrofahrzeuge mit PEM-Brennstoffzellen

von Ingo Hermann

## Überblick

Die Automobilindustrie strebt das Ziel an, den gemittelten CO<sub>2</sub>-Ausstoß bezogen auf die gesamte verkaufte Fahrzeugflotte auf 90 g CO<sub>2</sub>/km in den nächsten Jahren zu verringern. Die Fahrzeugkonzepte, welche die Adam Opel AG zur Erreichung dieses Ziels verfolgt und welche Erfahrungen dabei gewonnen wurden, werden – bezogen auf Elektrofahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb – vorgestellt.

The automobile industry pursues the goal to reduce the average CO<sub>2</sub>-emission, aggregated over the entire fleet of vehicles sold, to 90 g CO<sub>2</sub>/km within the next few years. The vehicle concepts which Adam Opel AG pursues to reach this goal and the operational and performance experience which has been gathered will be presented, focussing on electric traction concepts with fuel cells.

Im Zuge der sich verknappenden Rohstoffressourcen der Erde und eines wachsenden Umweltbewusstseins gewinnen alternative Antriebstechniken zunehmend an Bedeutung. Sie bieten die Möglichkeit, den Energieverbrauch von Automobilen zu minimieren und die Schadstoffemissionen deutlich herabzusetzen. Damit stellt die alternative Antriebstechnik ein wichtiges Geschäftsfeld innerhalb der Automobilbranche dar.

Die Automobilindustrie will die Kohlendioxidemissionen in den nächsten Jahren auf 90 g CO<sub>2</sub>/km reduzieren. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen sind direkt proportional zum Energieverbrauch. Man nähert sich dem Wert von drei Liter Benzin pro hundert gefahrenen Kilometern. Damit wird ein deutliches Energiesparsignal gesetzt. Diese Verringerung des Energieverbrauches wird für die verkaufte Fahrzeugflotte angestrebt, um über die Menge der Fahrzeuge einen eigentlichen Umweltvorteil zu erzielen.

Möglichkeiten der Energieeinsparung und Emissionsreduzierung liegen in der konventionellen Optimierung des Fahrzeugchassis. Bekannte Maßnahmen hierfür sind z. B. die Verringerung des Luftwiderstandes, der Bau kleinerer Fahrzeuge, die natürlich auch weniger Transportleistung und Komfort aufweisen, der Bau sehr leichter Fahrzeuge, die sehr teuer sind. Alternative Antriebe verbessern den Wirkungsgrad und somit die Energieeffizienz des Motors.

Durch die Verwendung von weniger kohlenstoffhaltigen Primärenergieträgern kann der CO<sub>2</sub>-Ausstoß reduziert werden.

Bei den Umwandlungsschritten vom Primärenergieträger zum Kraftstoff und von der chemisch gebundenen Energie im Kraftstoff zur mechanischen Energie am Rad durch den Antrieb entstehen Verluste. Bei der Optimierung muss die Gesamtwirkungskette ausgehend von der Primärenergie bilanziert werden, um ökologisch und ökonomisch sinnvoll zu arbeiten.

Die Vor- und Nachteile typischer Fahrzeugkonzepte sind:

- *Verbrennungsmotor Benzin/Diesel*  
+ Hohe Reichweite, hohe Leistung  
möglich, Erfahrung, Infrastruktur  
– Weiterentwicklungspotenzial
- *Verbrennungsmotor Erdgas*  
+ geringe Schadstoffemission  
– größere Tanks, mangelnde Infrastruktur
- *Hybridantrieb (Verbrennungsmotor und Elektroantrieb)*  
+ lokal emissionsfrei, gute Reichweite  
– komplexes Systemkonzept, höheres Gewicht
- *Elektrofahrzeug Batteriebetrieb*  
+ lokal emissionsfrei  
– geringe Reichweite, hohes Gewicht
- *Elektrofahrzeug Brennstoffzelle*  
+ hoher Wirkungsgrad, keine Stickoxide, stark reduzierte CO<sub>2</sub>-Emissionen  
– Entwicklung von Technologie und Infrastruktur notwendig

General Motors GM und die Adam Opel AG haben langjährige Erfahrung auf dem Gebiet der Elektrofahrzeuge. Seit 1970 arbeitet die Adam Opel AG auf diesem Sektor. 1970 wurde der Opel GT entwickelt, der mit Nickel-Cadmium-Batterien eine Leistung von 100 kW und eine Höchstgeschwindigkeit von 189 km/h erreichte. Über die Modelle Kadett „Impuls 1“ 1990, Astra Caravan „Impuls 2“ 1991 und Astra „Impuls 3“ 1993 wurde der Elektroantrieb weiter vorangetrieben. [Abbildung 2](#) zeigt die Technik des „Impuls 3“, bei dem der Antrieb in ein bestehendes Fahrzeugkonzept integriert wurde. Der „Impuls 3“ besitzt 5 Sitze, eine Leistung von 45 kW aus Nickel-Cadmium/Nickel-Natrium-Chlorid-Batterien, eine Höchstge

schwindigkeit von 120 km/h und eine Reichweite von 160 km. Die Adam Opel AG hat 1992 Feldtests durchgeführt mit 10 „Impuls 2“-Astras auf der Insel Rügen und mit 10 „Impuls 3“-Astras innerhalb des „Thermieprojektes“ im Dreiländereck Maastricht, Lütlich, Aachen. Daraus wurden Kundenerwartungen an ein Elektroauto abgeleitet. Generell wird eine geringe Reichweite von unter 80 km abgelehnt, die Höchstgeschwindigkeit muss für Autobahnfahrten ausreichend sein und höhere Kosten als bei konventionellen Fahrzeugen akzeptiert der Kunde selbst unter Berücksichtigung der sehr geringen Emissionen überhaupt nicht. Prinzipiell ist ein Einsatz der Elektroastras als „Erstauto“ mit Einschränkungen möglich.



Abbildung 2: Technik des Opel Astra „Impuls 3“

GM hat ebenfalls Erfahrung auf dem Gebiet der Elektrofahrzeuge, die mit der Serienfertigung des „EV 1“ seit Dezember 1996 ihren Höhepunkt erreichte. Es kann das Fazit gezogen werden, dass Batterien als Energiespeicher zu teuer und zu schwer sind. Aus diesem Grund wurde mit reinen Elektrofahrzeugen bislang noch kein großer Marktanteil erzielt. GM und Opel haben eine große Entwicklererfahrung auf dem Gebiet des elektrischen Antriebs und elektrisch betriebener Zusatzaggregate gewonnen.

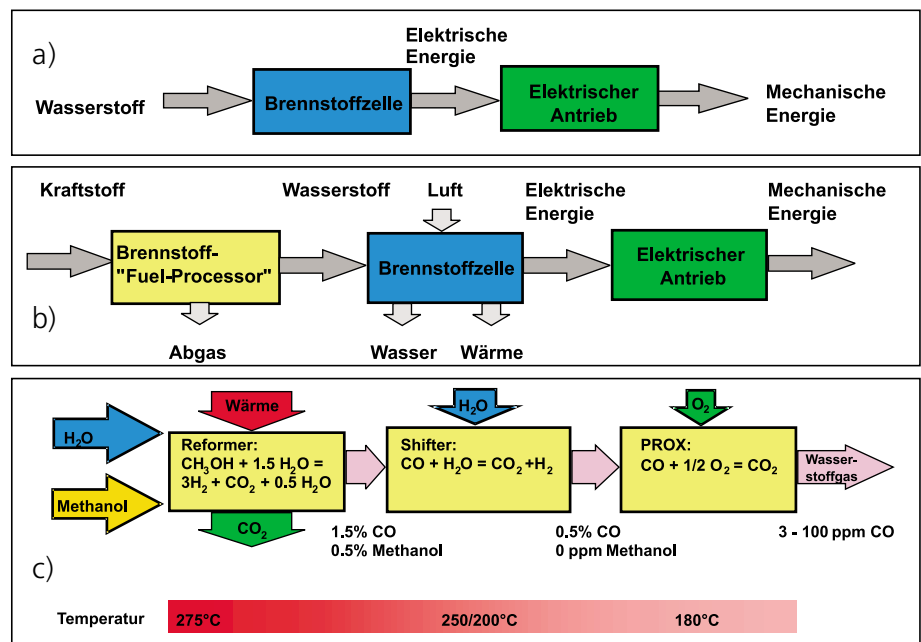
GM und die Adam Opel AG sehen mit einem Brennstoffzellenfahrzeug die Möglichkeit, Energieverbrauch und Emissionen deutlich herabzusetzen und gleichzeitig die Fahreigenschaften und den Komfort des konventionellen Verbrennungsmotorfahrzeugs beizubehalten. Aus diesem Grunde wurde Ende des Jahres 1997 das „Global Alternative Propulsion Center“, abgekürzt GAPC, gegründet. Dies ist ein global und interdisziplinär arbeitendes Projektzentrum von GM und Opel, das sich mit der Entwicklung des Brennstoffzellenantriebs bis hin zur Produktions- und Serienreife beschäftigt. GAPC besitzt drei Standorte: Mainz-Kastel in Deutschland, Rochester im Staat New York und Warren im Staat Michigan in den USA.

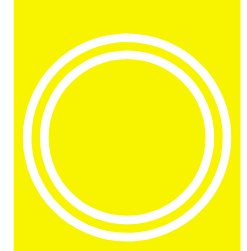
Abbildung 3 a) zeigt den prinzipiellen Aufbau eines H<sub>2</sub>-Brennstoffzellenantriebs. Der elektrische Antrieb, der die mechanische Energie am Rad bereitstellt, ist wie bei einem Batterie-

fahrzeug vorhanden. Die große Entwicklererfahrung auf diesem Gebiet verleiht GAPC viele Vorteile. Die elektrische Energie selbst stammt aus der Brennstoffzelle. Diese ist ein elektrochemischer Energiewandler, der die chemisch gebundene Energie des Wasserstoffs H<sub>2</sub> über eine räumlich entkoppelte Reduktions-/Oxidationsreaktion mit Luftsauerstoff in elektrischen Strom konvertiert. Eine Einzelzelle liefert Spannungen zwischen 0,6 – 0,8 V bei flächenbezogenen Stromdichten um 1 A/cm<sup>2</sup>. Durch eine

Reihenschaltung vieler Zellen wird das angestrebte Spannungsniveau erreicht. GAPC entwickelt Brennstoffzellenstacks im eigenen Hause. Die erzielten Strom-/Spannungskennlinien sowie gravimetrische und volumetrische Leistungswerte und Wirkungsgrade sind ausgezeichnet im internationalen Vergleich. Wasserstoff stellt aufgrund des Brennstoffzellenprinzips den originären Kraftstoff mit den höchsten Systemwirkungsgraden dar. GAPC untersucht und entwickelt solche Prototypsysteme auf H<sub>2</sub>-Basis. Als Emission ent-

Abbildung 3: H<sub>2</sub>-Brennstoffzellenantriebe: a) funktionaler Aufbau, b) mit „on-board“-Kraftstoffumwandlung, c) mit Kraftstoffaufbereitung auf Methanollbasis





steht prinzipiell nur Wasserdampf  $H_2O$ . Eine Infrastruktur für einen Individualverkehr mit Wasserstoff  $H_2$  ist noch nicht vorhanden. Man ist noch auf Tankstellen angewiesen, die flüssige Kraftstoffe bereitstellen. Aus diesem Grunde werden Brennstoffzellenantriebe mit „Fuel Processor“ untersucht. Wie in **Abbildung 3 b**) schematisch dargestellt, wird an Bord des Fahrzeugs der Brennstoffzelle ein so genannter „Fuel Processor“ vorgeschaltet, der die Umwandlung des flüssigen Kraftstoffs in wasserstoffreiches Synthesegas übernimmt.

Als Kraftstoffe kommen prinzipiell alle Kohlenwasserstoffverbindungen in Betracht. GAPC entwickelt und erprobt Prototypsysteme auf der Basis von Methanol und benzinähnlichen Kraftstoffen („Gasoline“). **Abbildung 3 c)** zeigt schematisch einen Fuel Processor mit Methanol-Dampf-Reformierung.

Im Reformer wird durch die endotherme Reaktion von Methanol mit Wasserdampf wasserstoffreiches Synthesegas erzeugt. Die erforderliche Prozesswärme wird über katalytische Verbrennung von Systembrennstoffströmen bereitgestellt. Da die Brennstoffzelle nur Kohlenmonoxidgehalte CO von maximal 100 ppm verträgt, muss der Reformierung eine Gasreinigung nachgeschaltet werden. Dabei kann es sich um einen „Shifter“ handeln, der CO und Wasserdampf in  $H_2$  und  $CO_2$  umsetzt. Durch den Shifter können die Kohlenmonoxid-Anteile im einstelligen Prozentbereich reduziert werden. Die Feinreinigung auf die erforderlichen,

minimalen CO-Gehalte erfolgt in der sogenannten „Preferential Oxidation“ durch eine selektive Oxidationsreaktion zu  $CO_2$ . Bei allen Reaktionen handelt es sich um heterogen katalysierte Gasphasenreaktionen, die an speziellen Katalysatoren ablaufen. Es werden eigene Reaktoren entwickelt, die in Bezug auf Dynamik, Volumen, Gewicht und Einsatzbedingungen den strengen automobilen Anforderungen gerecht werden müssen. Die Einzelkomponenten haben unterschiedliche Operationsbedingungen, wie z.B. die Temperatur. Dies muss durch eine sinnvolle Systemarchitektur ermöglicht werden.

Auf dem Pariser Autosalon im Herbst 1998 hat GM / Opel einen fahrfähigen Versuchsträger vorgestellt, den „Fuel Cell Zafira“ (**Abbildung 4**). Der Antriebsstrang besitzt einen Elektromotor mit 50 kW Antriebsleistung, 2 Brennstoffzellenstacks mit jeweils 25 kW Leistung und einen Fuel Processor auf Methanolbasis. Die Architektur entspricht der Prinzipskizze in **Abbildung 3 c)**. An Bord befindet sich ein 54-Liter-Methanoltank; diese Version besitzt noch eine Pufferbatterie zur Unterstützung bestimmter Fahrsituationen. Die Fahrleistungen liegen bei Beschleunigungen von 0 .. 100 km/h in 20 Sekunden und Maximalgeschwindigkeiten von 120 km/h.

In **Abbildung 5** wird die Verschaltung der Einzelkomponenten eines „Gasoline“-Antriebs verdeutlicht. Die metallischen Komponenten stellen die Reaktoren des Fuel Processors dar. Man erkennt den POX-Reformer, der  $H_2$  erzeugt, die Gasreinigung mit Shifter (LTS) und

selektiver Oxidation (PrOX), den Anodengaswärmetauscher (Anode HEX), um das Gas zu konditionieren, bevor es in den Brennstoffzellenstack eintritt. Rechts außen sitzt der Kompressor zur Bereitstellung der Luft. Im Vordergrund erkennt man den katalytischen Brenner (Combustor), der die Wärme zur Verdampfung (Vaporizer) von Wasser und Wasser/Benzin-Gemischen liefert.

**Abbildung 5** zeigt eine Architekturmöglichkeit auf, die es zu bewerten und validieren gilt. Neben der Optimierung der Architektur werden auch die Komponenten und Subsysteme untersucht und optimiert. Eine schrittweise Integration ins Fahrzeug wird so ermöglicht.

GM / Opel untersucht und optimiert Brennstoffzellenantriebe (BZ) auf der Basis von Wasserstoff  $H_2$  und flüssigen Kohlenwasserstoffen. Deutliche Vorteile des BZ-Antriebs liegen in den geringen Schadstoffemissionen und dem hohen Gesamtwirkungsgrad. Daraus resultieren ein geringerer Energieverbrauch und weniger  $CO_2$ -Emissionen. Die Philosophie von GAPC ist es, ein BZ-Fahrzeug zu entwickeln, das für den Individualverkehr geeignet ist und in seinen Fahreigenschaften dem Verbrennungsmotor gleichwertig oder überlegen ist. Bezüglich Geräuschemissionen, Bedienung und Service soll das BZ-Fahrzeug besser sein. In den Anforderungen Sicherheit, Komfort, Transporteigenschaften, Fahrleistung, Haltbarkeit und Kosten soll es dem Verbrennungsmotor mindestens gleichwertig sein. GM / Opel sehen im Brennstoffzellenantrieb die Technologie, die den Anforderungen der Zukunft unter sich ändernden Rahmenbedingungen gerecht wird.



◀ **Abbildung 4:** „Fuel Cell Zafira“ (links)  
**Abbildung 5:** Demonstration eines „Gasoline“-BZ-Antriebs

