

# Brennstoffzellen-Technologie im Test

- Alternatives Antriebskonzept mit dSPACE-Technik entwickelt
- Geschlossene Simulationsumgebung
- Durchgängige, modellgestützte Entwicklungskette

GM und Opel arbeiten daran, Wasserstofffahrzeuge mit Brennstoffzellen-Antrieb zur Serienreife zu entwickeln. Entscheidend für den gelungenen Fortgang des Entwicklungsprozesses ist der Einsatz von Simulationsmodellen in verschiedenen Prozessphasen sowie der Aufbau einer geschlossenen Simulationsumgebung. Dabei tragen diverse dSPACE-Produkte wie MicroAutoBox, dSPACE Simulator, ControlDesk und AutomationDesk maßgeblich zum Erfolg bei, da sie sich nahtlos in die durchgängige Entwicklungskette einfügen.

## Der Weg zum HydroGen3

Aufgrund des weltweit wachsenden Fahrzeugbestandes, der damit verbundenen Umweltaspekte sowie des steigenden Verbrauches an fossiler Energie ist die Entwicklung alternativer Antriebssysteme eine große Herausforderung für die Automobilindustrie. Wasserstoffbetriebene Fahrzeuge haben dabei das größte Potential, sich als Alternative gegenüber den heute gebräuchlichen Verbrennungsmotoren zu etablieren. Vor diesem Hintergrund wurde im November 1997 von General Motors und Opel das Brennstoffzellen-Entwicklungszentrum GM Fuel Cell Activities (GM FCA) gegründet. Und zwar mit

dem Ziel, die Brennstoffzellen-Technologie zur Serienreife zu entwickeln. Dafür haben GM und Opel bisher über eine Milliarde Dollar investiert. Heute arbeiten rund 600 Mitarbeiter an insgesamt fünf Standorten in den USA (Rochester, Warren, Torrance), in Deutschland (Mainz-Kastel) und in Japan (Tokio) mit unterschiedlichen Schwerpunkten am gemeinsamen Brennstoffzellen-Programm. Der aktuelle Entwicklungsstand ist das auf einem Opel Zafira basierende Versuchsfahrzeug „HydroGen3“.

## Kompaktes Kraftwerk unter der Haube

Das Herzstück des HydroGen3 ist die Brennstoffzelle, ein kompaktes und hoch effizientes Kraftwerk, das samt Elektromotor und Nebenaggregaten komplett unter die Fronthaube des Opel Zafira passt. In dem von GM FCA entwickelten Brennstoffzellen-Stapel (englisch: Stack) mit 200 in Reihe geschalteten Einzelzellen reagieren in einem elektrochemischen Prozess Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser und erzeugen auf diese Weise elektrische Energie. Mit deren Hilfe wird der Elektromotor des HydroGen3 angetrieben, der 60 kW/82 PS leistet. Das Aggregat mit einem maximalen Drehmoment von 215 Nm beschleunigt den Brennstoffzellen-Zafira in rund 16 Sekunden von Null auf Tempo 100 und ermöglicht eine Höchstgeschwindigkeit von 160 km/h. Bezüglich der Tanksysteme fährt man bei GM FCA zurzeit zweigleisig. Ein Teil der Versuchsfahrzeuge, „HydroGen3 liquid“ genannt, wird mit superisolierten Tanks für tiefgekühlten, flüssigen Wasserstoff ausgerüstet. Die anderen Fahrzeuge mit Namen „HydroGen3 compressed 700“ haben Hochdrucktanks und speichern den Wasserstoff als Gas unter einem Druck von bis zu 700 bar.



▲ Eines der HydroGen3-Versuchsfahrzeuge.



▲ Die Brennstoffzelle – das Kraftwerk unter der Motorhaube.

### Umfassender Einsatz von Simulationstechnik

Die Steuerungsentwicklung für den Brennstoffzellen-Antrieb verläuft in einem durchgängigen Entwicklungsprozess, der sich am klassischen V-Modell anlehnt. Dabei kommt dem nahtlosen Einsatz der Simulationstechnik in allen Phasen des Entwicklungsprozesses eine besondere Bedeutung zu. Mit den Jahren hat GM FCA ein fundiertes Spezial-Know-how aufgebaut, was Brennstoffzellen-Antriebe angeht. Mit spezifischen Modellierungswerkzeugen, wie zum Beispiel MATLAB®/Simulink®, wurde ein geschlossenes Simulationsmodell des Gesamtsystems entwickelt. Es besteht aus Komponenten für das Brennstoffzellen-Antriebssystem (Fuel Cell Propulsion System, FCPS), den entsprechenden FCPS-Controller, der Fahrzeugplattform (Vehicle Plant Model) und der Restbus-Simulation weiterer Steuergeräte. Das Brennstoffzellen-Antriebssystem gliedert sich wiederum in verschiedene

Teilsysteme (Electric Storage System, Fuel Cell Power Module, Electric Traction System, Cooling System, H2 Storage System und Driver Interface). Das Modell für die Fahrzeugplattform entspricht weitgehend der Ausführung des Serienfahrzeugs. Durch den Einsatz von dSPACE-Produkten können die einmal entwickelten Simulationsmodelle in verschiedenen Prozessphasen erfolgreich eingesetzt werden, also nicht nur während der Model-in-the-Loop-Simulation, sondern zum Beispiel auch beim Rapid Control Prototyping (RCP) und bei der Hardware-in-the-Loop-Simulation (HIL-Simulation). Das Modell

des Gesamtsystems bildet zudem die Basis für weitere Anwendungen. Es dient nicht nur der Entwicklung des FCPS-Controllers, sondern auch dem Betrieb von Testständen, der Systemintegration sowie der Entwicklung von Betriebsstrategien.

### Entwicklung des FCPS-Controllers

Nach umfangreichen Offline-Simulationen am Arbeitsplatz erfolgte der Test des entwickelten FCPS-Controllers anfänglich ohne seriennahe Steuergeräte nur durch den Einsatz einer MicroAutoBox als Prototyping-System. Dabei ließ sich das Controller-Modell durch Autocoding leicht auf die MicroAutoBox transferieren. Nach erfolgreichem Fullpass-Prototyping wird seit 2004 das Seriensteuergerät E67 (von GM Powertrain) für den FCPS-Controller eingesetzt. Funktionen, die noch in der Entwicklung sind, werden im Bypass-Betrieb über die MicroAutoBox



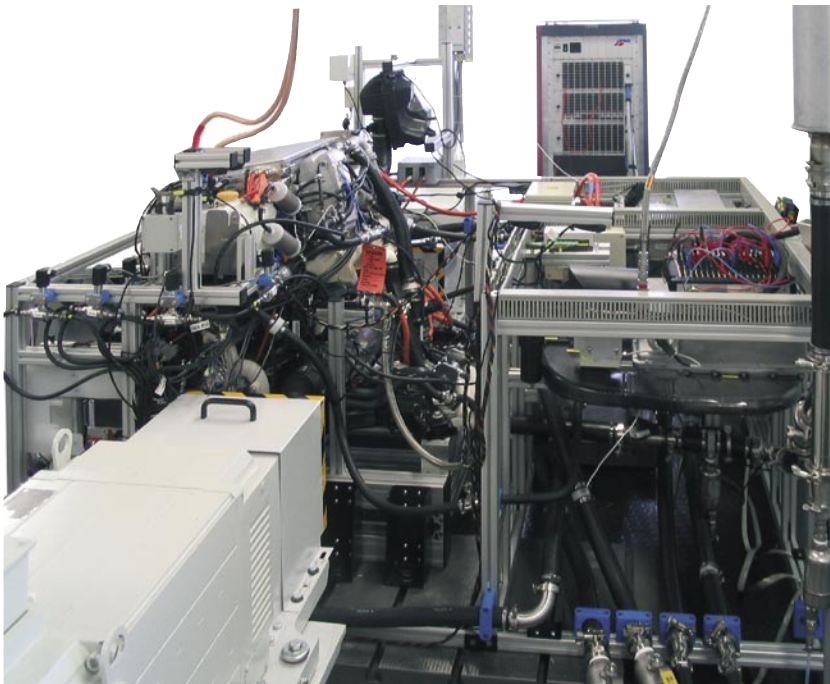
- Luftkompressor
- Gleichspannungswandler
- Luftfilter
- Brennstoffzellen-Stapel
- Servolenkpumpe
- Umwälzpumpe
- Kühlmittelpumpe
- Kühler
- Elektromotor
- Klimaanlagenkompressor

- Wasserstoffeinfüllstutzen
- Gleichspannungswandler (42 V)
- Starterbatterie (12 V)
- Gleichspannungswandler (12 V)
- Elektrische Feststellbremse
- Hochdruck-Wasserstofftank

realisiert. Heute werden FCPS-Controller für die Vorserienentwicklung sowohl in HIL-Testständen (basierend auf dSPACE Simulator Mid-Size) als auch in einer Flotte von Versuchsfahrzeugen getestet.

### **Einsatz der HIL-Simulation an Testständen**

Die Entwicklungsverantwortung für die einzelnen Teile des Brennstoffzellen-Antriebssystems ist bei GM auf mehrere Standorte verteilt. Trotz der Parallelentwicklung der Systemkomponenten an verschiedenen Standorten ist GM FCA durch den Einsatz der HIL-Simulation jederzeit in der Lage, sowohl den FCPS-Controller als auch die Teilsysteme frühzeitig zu validieren. Mit einem dSPACE Simulator Mid-Size werden derzeit Brennstoffzellen-Antriebteststände mit Dynamometer sowie reine Brennstoffzellen-Teststände betrieben. In beiden Fällen ersetzt der HIL-Simulator bestimmte nicht verbaute Teilsysteme oder Steuergeräte am realen Prüfling. Die entsprechenden Simulationsmodelle aus der MIL-Simulation können dabei ohne großen Anpassungsaufwand wieder verwendet werden. An dSPACE-Software wird unter anderem ControlDesk für den Aufbau von Simulator-Bedienoberflächen sowie AutomationDesk für den automatischen Testbetrieb des Brennstoffzellen-Teststands eingesetzt.



▲ Brennstoffzellen-Antriebteststand mit dSPACE Simulator.

### **Vorteile der HIL-Simulation**

Die simulierten Komponenten lassen sich am HIL-Teststand sukzessive mit ihren realen Gegenstücken austauschen. Es kann dort problemlos zwischen Modell und Realität hin- und hergewechselt werden, so dass jederzeit ein vollständiger Test des geschlossenen Gesamtsystems durchgeführt werden kann.

Durch frühe Tests der Teilsysteme am HIL-Teststand werden die Kopplungen zu benachbarten Teilsystemen und Steuergeräten untersucht. Damit lässt sich schon frühzeitig eine höhere Reife und Qualität auf Subsystem-Ebene erzielen, was letztlich zu einer erheblichen Aufwandsreduzierung bei der späteren Systemintegration führt.

### **Zusammenfassung und Ausblick**

Für die Entwicklung des Wasserstoffantriebs hat GM FCA eine durchgängige, simulationsgestützte Entwicklungsumgebung verwirklicht. MIL- und HIL-Simulationen haben sich erfolgreich zu festen Bestandteilen der Steuerungs-Entwicklungsumgebung und der Brennstoffzellen-Teststände etabliert. Die gesamte Simulationsumgebung ist mit geringen Software-Anpassungen flexibel für unterschiedliche Betriebsweisen (Offline-/HIL-/Restbus-Simulation) konfigurierbar. Die modellbasierte Entwicklung ermöglicht Offline-Simulationen am Arbeitsplatz, Echtzeit-Simulation an HIL- und System-Testständen sowie Control Prototyping an Testständen und in Fahrzeugen. Die Verwendung von verschiedenen dSPACE-Produkten gewährleistet dabei den nahtlosen Einsatz der Simulationstechnik in allen Phasen des Entwicklungsprozesses. Dadurch können einheitliche Versionen der Steuerungs-Software für Teststände und Fahrzeuge verwendet werden, und es gibt keinen extra Wartungsaufwand für spezielle Teststand-Software.

*Dr.-Ing. Stefan Sinsel  
Adam Opel GmbH  
GM Fuel Cell Activities  
Deutschland*