

# Steuergeräteverbundtest mittels Hardware-in-the-Loop-Simulation

Dipl.-Ing. Susanne **Köhl**<sup>1)</sup>, Dr. Daniel **Lemp**<sup>2)</sup>, Dipl.-Ing. Markus **Plöger**<sup>1)</sup>, Dr.-Ing. Rainer **Otterbach**<sup>1)</sup>

1) dSPACE GmbH, Paderborn      2) Adam Opel AG, Rüsselsheim

## Zusammenfassung

Die für Innenraumkomfort und passive Sicherheit zuständige Elektronik des neuen Opel Vectra zeichnet sich durch ein Netzwerk zahlreicher Steuergeräte unterschiedlicher Hersteller aus. Der Test dieses Steuergeräteverbunds ist besonders aufwendig. Bisherige Testmethoden stoßen schnell an ihre Grenzen. Durch den Einsatz von Hardware-in-the-Loop-Simulation erreicht Opel eine große Testfallabdeckung und Testtiefe. Der Nutzen des eingesetzten Hardware-in-the-Loop-Simulators wird durch die Automatisierung der Tests deutlich erhöht. Zukünftig sollen automatisierte Tests auch auf frühere Phasen der Steuergeräte-Entwicklung ausgedehnt werden.

## Summary

The electronics responsible for the comfort and passive safety systems in the new Opel Vectra involve a network of numerous electronic control units from different manufacturers. Testing the ECU network is a particular challenge. Existing test methods soon come up against their limits. By using hardware-in-the-loop simulation, Opel achieved extensive test coverage and depth. Test automation considerably enhances the benefit of using the hardware-in-the-loop simulator. In future, test automation will also be extended to earlier stages of ECU development.

## 1 Steuergeräteverbund für Innenraumkomfort und Sicherheitssystem im Opel Vectra

Der neue Opel Vectra wurde von Grund auf neu entwickelt. Neben Design- und Fahrdynamikneuerungen setzt er mit Komfort auf höchstem Niveau und einem der modernsten Sicherheitssysteme seiner Klasse Maßstäbe für zukünftige Mittelklassefahrzeuge: Insgesamt regeln in einem integrierten elektronischen System allein 15 via CAN-Bus vernetzte Steuergeräte den Innenraumkomfort und das Sicherheitssystem. Dazu gehören elektronische Klimaregelung, Kommunikations- und Unterhaltungselektronik, einstellbare Vordersitze, Regensensoren und Einparkhilfen, passive Sicherheitsausstattung: Front-, Seiten-, und Vorhangs-Airbags im Kopfbereich, das von Opel patentierte Pedal Release System sowie verbesserte aktive Kopfstützen zum Schutz vor Schleudertrauma (Bild 1, Tabelle 1).

Die Datenbus-Vernetzung der Steuergeräte im Kraftfahrzeug ermöglicht eine gemeinsame Nutzung der Sensorik, errechneter Informationen und der Aktuatorik durch verschiedene Funktionen. Durch die Vernetzung der Steuergeräte lassen sich die zahlreichen Funktionen (z. B. Komfort und Sicherheit) über alle Fahrzeugklassen hinweg flexibel und ökonomisch realisieren.

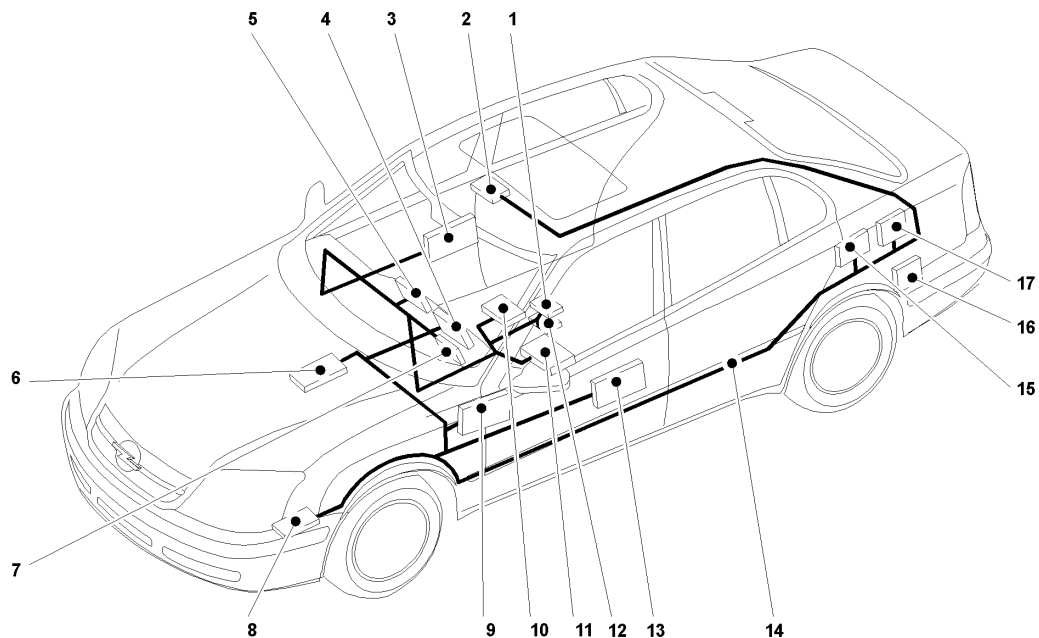


Bild 1 Steuergeräte-Anordnung im Low-Speed-CAN-Netzwerk des Vectra C

Nr.	Abkürzung	Legende
1	SDM	Airbag-Modul
2	SRM	Schiebedachmodul
3	PDM	Beifahrertürmodul
4	CIM	Lenkstockmodul
5	TID/GID/CID	Triple-, Grafik- und Farb-Informationsanzeige
6	AHS	Zusatzheizsystem
7	IPC	Instrumententafel
8	UEC	Zentralmodul für Motorraum-Elektronik
9	BCM	Karosserie-Steuergerät
10	SLM	Fahrstufen-/Fahrprogrammwahlhebel
11	DSM	Fahrersitzmodul
12	DLC	Diagnosestecker
13	DDM	Fahrertürmodul
14	LSCAN Wire	Low-Speed-CAN-Netzwerk
15	REC	Rear Electrical Center
16	TPM	Tire Pressure Monitoring
17	PAS	Parking Assistance System

Tabelle 1: Module des Low-Speed-CAN-Netzwerkes im Vectra C

Neben dem Verbund für Innenraumkomfort und Sicherheitssystem (Low-Speed CAN) befinden sich auch noch ein High-Speed-CAN-Verbund (HSCAN) für den Antriebsstrang und ein Mid-Speed-CAN-Verbund (MSCAN) für die Steuerung der Unterhaltungselektronik im Opel Vectra (Bild 2). Spezielle Steuergeräte übernehmen Schnittstellenfunktionen zwischen den o.g. CAN-Verbunden. In Fahrzeugen der Epsilon-Plattform (Vectra) fungieren das Lenkstockmodul CIM und das Display-Modul DIS als Gateways.

Bedingt durch die Anzahl der beteiligten Steuergeräte und den Kommunikationsaufwand stellt die Überprüfung des Zusammenspiels aller Komponenten und ihrer Funktionen im Verbund eine große Herausforderung dar. Da die Komponenten von unterschiedlichen Zulieferern bereitgestellt werden, kann dieser Test letztendlich erst beim Automobilhersteller erfolgen.

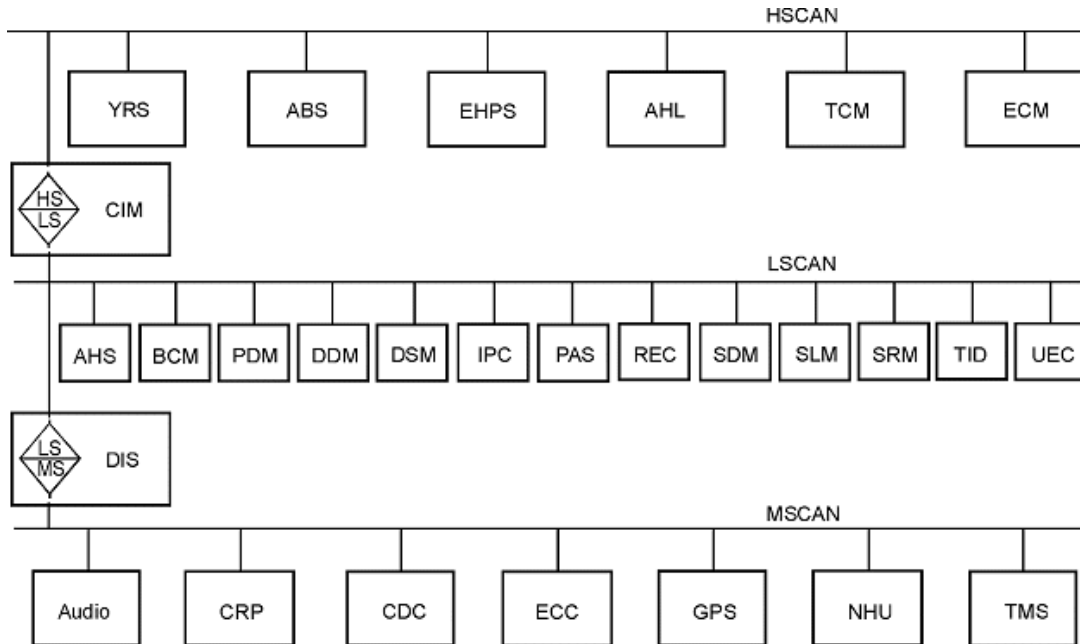


Bild 2 Gesamt-Netztopologie im CAN-Bus-Netzwerk des Opel Vectra.

## 2 Vorgehensweise bei Entwicklung und Test der Steuergeräte

Die Spezifikation der einzelnen Steuergeräte und die Spezifikation des erforderlichen Kommunikationsnetzwerks erfolgt bei Opel. Steuergeräte-Hardware und -software werden bei verschiedenen Zulieferern im Auftrag von Opel entwickelt. Opel erstellt die Spezifikationen in der Regel mit Hilfe von Tools (z.B. Statemate) und gibt sie an den Zulieferer als ausführbare Spezifikation weiter. Durch diese Vorgehensweise erhält sich Opel die Hoheit über die Steuergeräte-Topologie - kann jedoch die Entwicklung der einzelnen Komponenten auslagern. Allein im Low-Speed-CAN-Netzwerk des Vectra C sind an Hardware, Software und Kabelsatz insgesamt 16 Tier-One-Supplier beteiligt.

Opel erwartet von seinen Lieferanten, dass der Test auf Komponentenebene bereits erfolgreich abgeschlossen ist, bevor die Komponenten für den Gesamttest bei Opel freigegeben werden. Für diese Komponententests stellt Opel den Zulieferern die erforderlichen Daten für eine Restbus-Simulation zur Verfügung. Der Lieferant übernimmt die Verantwortung für das Erfüllen der Spezifikation und stellt Opel die Testergebnisse der einzelnen Steuergeräte-Funktionalitätstests zur Verfügung.

Im Anschluss müssen die Steuergeräte-Prototypen auf Systemebene beim Fahrzeughersteller auf Funktion geprüft werden. Zu diesem Zweck hat Opel ein System gesucht, mit dem nicht nur einzelne Steuergeräte getestet werden, sondern zusätzlich die Steuergeräte im Verbund und ihre Schnittstellen zum Fahrer sowie zur Antriebsstrang- und Chassis-Elektronik getestet werden können.

## **2.1 Fahrzeugtests mit Prototypen-Fahrzeugen**

Wie alle Hersteller unterzieht auch Opel seine Fahrzeuge extensiven Fahrzeugtests zur Validierung des Fahrzeugs und aller seiner Komponenten. Die Nachteile dieser Tests im Fahrversuch (Sommer-/Wintererprobung) sind bekannt: Hoher Zeitaufwand und hohe Kosten, keine 100%ige Reproduzierbarkeit, schlechte Abdeckung von Grenzsituationen aufgrund des Gefahrenpotentials für Mensch und Fahrzeug. Obwohl es derzeit undenkbar ist, Erprobungsfahrten völlig durch andere Testmethoden zu ersetzen, wird ein Ausweiten der Testtiefe sowie ein Erreichen der Testdurchgängigkeit im Labor angestrebt, um die Fahrzeugtests auf ein Minimum reduzieren zu können.

## **2.2 „Bench Boat“**

Relativ neu ist das „Bench Boat“ (Bild 3), eine Opel Eigenentwicklung. Lange bevor der erste Fahrzeug-Prototyp vorhanden ist, simuliert das „Bench Boat“ die Positionen der einzelnen Module im Fahrzeug und ermöglicht es somit, ihre Funktionalität auch schon im Netzwerk zu überprüfen. In diese dreidimensionale „Werkbank“ werden alle Instrumente, Displays, Lampen bis hin zu Scheibenwischern integriert. Eine erhöhte Fahrerkabine erlaubt eine manuelle Bedienung. Während der Fahrzeugentwicklung werden die einzelnen Komponenten peu à peu durch Prototypen ausgetauscht, die bereits im Vorfeld umfangreichen Einzeltests unterzogen wurden.

Da Antriebsstrang und Chassis in diesem Aufbau fehlen, werden Raddrehzahlen durch elektrische Motoren simuliert. Notwendige Signale wie Kühlwassertemperatur für das Motorsteuergerät werden als Stimulus zur Verfügung gestellt; somit kann auch die Plausibilität innerhalb des Netzwerks überprüft werden. Sobald vorhanden kann auch ein reales Prototypen-Fahrzeug über einen Prüfstand direkt mit dem „Bench Boat“ verbunden werden und die „echten“ Daten einspeisen [3].

Das „Bench Boat“ hat sich für den frühen Test (Hard- und Software) von Steuergeräte-Prototypen und anderen elektrischen Fahrzeugkomponenten bewährt, ist jedoch sehr teuer im Aufbau und im Betrieb. Vorwiegend werden Eigendiagnosefunktionalität und bereits bekannte kritische Betriebszustände getestet. Die Tests werden ausschließlich manuell vom „Testfahrer“ durchgeführt und sind somit nur schlecht reproduzierbar – eine automatische Dokumentation der Testergebnisse ist nicht möglich. Eine vollständige Testabdeckung ist in dieser Umgebung nicht gegeben.



Bild 3 „Bench Boat“

Aufgrund der Nachteile der bisherigen Testverfahren hat Opel für den Test des Steuergeräteverbunds der Komfort- und Sicherheitskomponenten das Hardware-in-the-Loop-Simulationsverfahren ergänzend eingeführt.

### 3 Hardware-in-the-Loop-Simulation bei Opel

#### 3.1 Entscheidung für Hardware-in-the-Loop-Simulation

Bei ausschließlich manuellen Tests ist die Testfallabdeckung unzureichend. Die möglichen Systemzustände variieren bei der Nutzung durch den Kunden ins Unermessliche. Somit haben manuelle Tests allenfalls „Stichprobencharakter“.

Eine sehr viel höhere Testfallabdeckung kann mit Hilfe von automatisierten Tests erreicht werden. Gleichzeitig wird Reproduzierbarkeit erlangt. Die Hardware-in-the-Loop (HIL) Simulation bietet genau diese Möglichkeiten: Automatisiertes Testen von Steuergeräte-Hard- und -Software im Zusammenspiel mit anderen Komponenten in ausreichend genau simulierter Umgebung.

Die dazu notwendigen Voraussetzungen [1] sind:

- Erfassung aller relevanten Signal- und Treiberausgänge der Steuergeräte,

- Ansteuerung aller Steuergeräte-Eingänge bzw. Simulation von Sensoren,
- Kontrolle (inklusive gezielter Manipulation) aller CAN-Signale,
- reproduzierbare funktionale Tests mit verschiedenen Steuergeräte-Varianten.

Für den Verbundtest der Innenraum-Steuergeräte des im Januar 2002 in Produktion gegangenen Opel Vectra wurde deshalb zum ersten Mal ein Hardware-in-the-Loop-Simulator von dSPACE eingesetzt. Dieser Simulator ist seit September 2001 in Nutzung. Trotz der Kürze der verbleibenden Zeit konnte die Testabdeckung durch Erhöhung der Anzahl der Testfälle bereits deutlich erhöht werden. Nach ersten Tests für den Viertürer mit 4-Zylinder-Motor wurden schon bald die Simulations-Modelle ausgebaut, um Tests auch auf neue Karosserie-, Motor- und Getriebetypen sowie den angekündigten Astra-Nachfolger auszuweiten.

Derzeit wird der HIL-Simulator von einem Opel-Spezialisten betreut, der verantwortlich für die Simulatorhardware (bei Umbau, etc.) und für die Simulatorsoftware (Testerstellung) zeichnet. Die jeweiligen Entwicklungsabteilungen können den HIL-Simulator zum Testen ihrer Komponenten als zusätzliche Option nutzen und entsprechende Tests spezifizieren.

### **3.2 Aufbau des Hardware-in-the-Loop-Simulators**

Nach der Evaluierung von am Markt verfügbaren HIL-Simulatoren, hat sich Opel für den dSPACE Simulator entschieden [2]. Entscheidungsgrundlage waren neben der klaren – für den Kunden offenen – Hardwarearchitektur die guten Erfahrungen, die Opel bereits in anderen Gruppen mit der gesamten dSPACE-Werkzeugkette für die Steuergeräte-Entwicklung gemacht hat, insbesondere bei der Entwicklung der Brennstoffzellen-Technologie im Global Alternative Propulsion Center (GAPC) in Deutschland und in den USA [5] sowie mit den verschiedensten Rapid Prototyping Anwendungen in der Vorausentwicklung Elektrik/Elektronik. Inzwischen ist auch die Rüsselsheimer Diagnose-Testabteilung des GM-Fiat-Powertrain Joint-Ventures mit HIL-Simulator für den Test mehrerer Motorsteuergeräte in die HIL-Simulation mit dSPACE eingestiegen. Die Projekte laufen seit Sommer 2002.

Für die Wahl des nachfolgend beschriebenen Aufbaukonzepts des Simulators (Bild 4, "dSPACE Simulator Full-Size" [6]), waren vor allem folgende Punkte ausschlaggebend:

- Die hohe Wiederverwendbarkeit bzw. Modifizierbarkeit der gesamten Hardware- und Software, speziell mit Blick auf spätere Umbaumaßnahmen für neue Projekte,
- die Vielzahl der benötigten (insbesondere digitalen) Ein- und Ausgangssignale,
- die Notwendigkeit, eine große Anzahl von Steuergeräten und Echtlasten anzuschließen.



Bild 4 dSPACE Simulator nach Umrüstung von Epsilon- auf Delta-Plattform durch Opel

### 3.2.1 Simulator-Hardware

Der Hardwareaufbau für die Erfüllung aller Anforderungen besteht im Einzelnen aus folgenden Komponenten:

- PowerPC 750 / 480MHz Prozessor für die Berechnung von I/O und Modellen in Echtzeit,
- 104 digitale Ein- und 192 digitale Ausgänge,
- 8 Kanäle zur Erzeugung und Vermessung von PWM-Signalen,
- 32 analoge Eingänge und analoge Ausgänge,
- 4 Widerstandssimulationskanäle,
- 4 CAN Interfaces für ca. 1200 Signale in 200 Botschaften,
  - Low-Speed CAN (Single wire Low-Speed-CAN – inclusive Fehlergateway und wakeup-Modus),
  - High-Speed-CAN (Powertrain-CAN),
- Signal Konditionierung in Form von off-the-shelf Standard-Modulen für
  - Pegelanpassungen,



- Schutzbeschaltung der Ein- und Ausgänge und
  - Kompensation von Potentialversatz an Steuergeräte-Eingängen.
- Lastsimulation oder Echtlasten,
- Fehlersimulation auf Steuergeräte-Ausgängen mit den Fehlermöglichkeiten:
  - Kurzschluss nach Masse,
  - Kurzschluss nach Batteriespannung und
  - Leitungsunterbrechung.
- Spannungsversorgung der Steuergeräte,
- separates Komponenten-Rack mit Steuergeräten und Echtlasten (Beistellung durch Opel),
- Klemmleisten für externen Messzugriff,
- Steckverbinder zum flexiblen Austausch des Racks.

### 3.2.2 Simulator-Software und Modelle

Die Echtzeitsoftware des Simulators entsteht vollständig aus MATLAB/Simulink heraus mittels grafischer Programmierung und anschließender automatischer C-Code-Generierung. Dabei wird die I/O mit dem Real-Time-Interface (RTI), einer I/O Blockbibliothek unter Simulink, programmiert.

Im Bereich Innenraumkomfort genügen im Gegensatz zu Anwendungen aus dem Antriebsstrang oder der Fahrdynamik häufig sehr einfache Streckenmodelle. An die Stelle komplexer, nichtlinearer Differentialgleichungssysteme hoher Ordnung treten kleine kinematische Funktionsmodelle oder reine Logikmodelle. Beispielsweise erwartet das Steuergerät für die Ansteuerung der Scheibenwischer, dass der laufende Wischer in Abhängigkeit von der Wischergeschwindigkeit regelmäßig die Parkposition durchfährt. Die Rückmeldung geschieht über das Signal „Wiper-Park-Position“, was entsprechend zyklisch aktiviert werden muss (Bild 5).

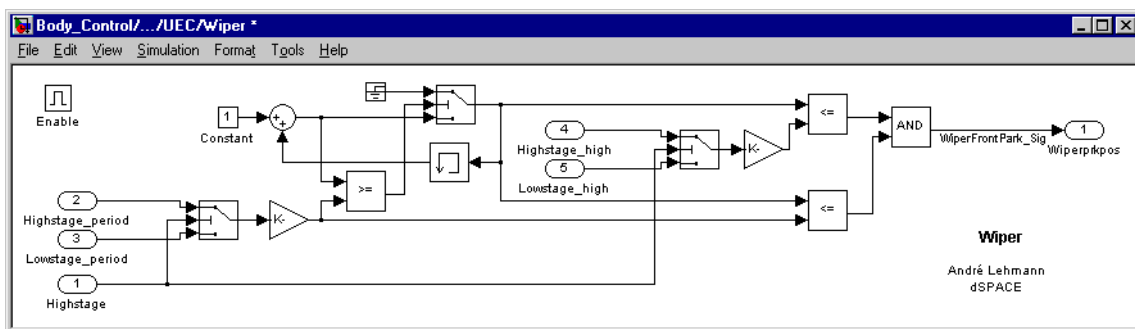


Bild 5 Logikmodell für die Scheibenwischer-Park-Position.

Andere Beispiele für derartige Modelle können sein:

- Modell für den Schließzustand der Türschlösser als logische Verknüpfung mehrerer Ausgangssignale vom Türsteuergerät,
- kinematisches Modell für die elektrische Verstellung der Außenspiegel mit Rückmessung über Potentiometer,
- kinematisches Modell für die elektrische Sitzverstellung mit Rückmessung über Hall-Sensoren,
- kinematisches Modell für die elektrischen Fensterheber.

Die manuelle Bedienung des Simulators erfolgt über ein ControlDesk-Experiment mit konfigurierten Layouts.

Automatische Testabläufe werden über die in ControlDesk integrierte Testautomatisierung implementiert. Dabei kommen sowohl Excel-basierte Lösungen [7] als auch einfachere mittels Makrorecorder erstellte Tests zum Einsatz.

### **3.2.3 Besonderheiten**

#### **Test des Steuergeräte-Verhaltens bei Fehlern in der CAN-Kommunikation**

In einem System für den Test von Steuergeräteverbunden kommt dem Test der CAN-Kommunikation eine besondere Bedeutung zu. Mögliche Fragestellungen dabei können sein:

- Wie verhält sich das Steuergerät oder die verteilte Funktion, wenn eine erwartete CAN-Botschaft ausbleibt?
- Wie reagiert das Steuergerät, wenn bestimmte CAN Botschaften unplausible Signale enthalten?

Daraus resultieren für das Testsystem folgende Anforderungen:

- Einzelne oder mehrere CAN Botschaften eines beliebigen Steuergerätes müssen gezielt unterdrückbar sein.
- Einzelne oder mehrere Botschaften eines beliebigen Steuergerätes aus dem Verbund müssen gezielt manipulierbar sein.

Bild 6 zeigt die Realisierung dieser Anforderungen. Im Simulator sind für den (Eindraht)-Low-Speed-CAN-Bus zwei CAN Controller vorhanden. Jedes Steuergerät kann separat wahlweise mit einem dieser beiden Controller verbunden werden. Über eine Software arbeitet der Simulator als Fehlergateway zwischen den beiden Controllern. Alle Botschaften, die auf einem Controller empfangen werden, werden sofort wieder an den anderen Controller gesendet. So ist gewährleistet, dass jedes Steuergerät die CAN-Botschaften aller Steuergeräte empfängt. Die auftretenden Verzögerungen sind dabei so gering, dass die Steuergeräte dadurch nicht beeinflusst werden. Mittels Software-Manipulationsblöcken können nun Fehlerfälle bis auf Botschafts- oder Einzelsignalebenen herunter erzeugt werden.

Während die Software im realisierten Fall noch zum größeren Teil kundenspezifisch implementiert wurde, wird der CAN-Gateway-Betrieb zukünftig auch durch Standard RTI Blöcke unterstützt.

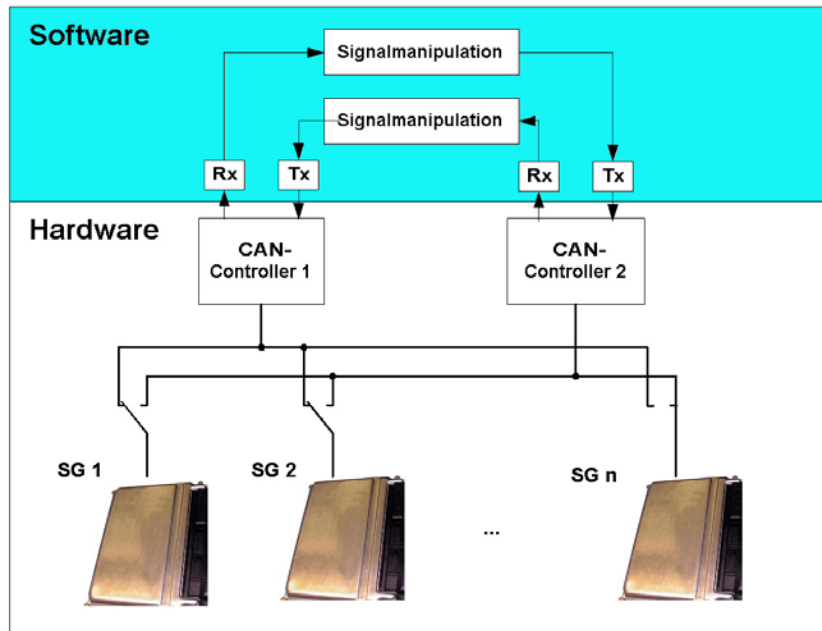


Bild 6 CAN-Konzept mit Fehlergateway.

### Test der Ruhestromaufnahme der Steuergeräte

Bei der Vielzahl der eingebauten Steuergeräte im Fahrzeug ist es notwendig, den Stromverbrauch auf ein Minimum zu reduzieren, insbesondere für den Zeitraum, in dem die Steuergeräte nicht aktiv im Einsatz sind. Mit den Powerswitch-Modulen von dSPACE ist es möglich, das Netzwerk-Management (z. B. Ruhemodus und Aufwachfunktionalität) der Steuergeräte zu testen. Dabei wird der Stromverbrauch mittels Messbereichsumschaltung sowohl im Betriebszustand (mehrere Ampere) als auch im Ruhezustand (typischerweise <1mA) mit hoher Genauigkeit gemessen.

Das Powerswitch-Modul kann das angeschlossene Steuergerät wahlweise aus einem von zwei Netzteilen versorgen. So lassen sich Einflüsse unterschiedlich starker Spannungsabfälle auf den Versorgungsleitungen zu den einzelnen Steuergeräten untersuchen.

### 3.2.4 Umrüsten des Simulators auf Delta-Plattform

Nach dem Abschluss der Vectra-Neuentwicklung stehen nun die Neuentwicklungen für den Astra-Nachfolger bei Opel an. Der neue Astra, der Anfang 2004 zunächst als fünftürige Kompaktklimousine auf den Markt kommen wird, soll zum Konkurrenten VW Golf

aufschließen. Dieser Astra wird erstmals „Premiumqualität“ bieten, die auf dem Niveau des heutigen Vectra liegen wird.

Um diese Neuentwicklung frühzeitig zu begleiten, hat Opel inzwischen den dSPACE Simulator von der Epsilon-Plattform (Vectra) auf die Delta-Plattform (Astra-Nachfolger) umgerüstet. Wesentlicher Unterschied in den Funktionalitäten der Delta- und der Epsilon-Plattformen ist das Wegfallen des Türmoduls und der automatischen Sitzverstellung bei den Delta-Plattformen.

Diese Umrüstung (Hardware und Modellierung) erfolgte durch den für den Simulator verantwortlichen Opel-Spezialisten in Eigenregie. Nur selten musste hierfür auf telefonischen Support der Projektingenieure der dSPACE GmbH zurückgegriffen werden. Da im Vorfeld nicht bekannt war, dass schon so bald ein Umrüsten des Simulators notwendig war, wurde die ursprüngliche Simulatorkonfiguration speziell auf die Epsilon-Plattform ausgelegt (Signal Mapping im Modell). Für zukünftige Simulator-Projekte bevorzugt Opel eine projektunabhängige Benennung der Ein- und Ausgangssignale, welche die Umkonfiguration erleichtert.

## **4 Nutzung des Hardware-in-the-Loop-Simulator bei Opel**

### **4.1 Testerstellung**

Die von den Steuergeräte-Abteilungen spezifizierten Tests werden in Zusammenarbeit mit dem HIL-Spezialisten umgesetzt. In der Regel erfolgen diese Tests zunächst am Verbundsystem als Blackboxtest (d.h. Know-how über Software-Strukturen wird nicht berücksichtigt). Dafür werden Testabläufe mit Standard-Bedienabfolgen aus Kundensicht zusammengestellt. Um eine breite Testfallabdeckung zu erzielen, werden entsprechend viele Szenarien unter unterschiedlichen Randbedingungen getestet. Oft erfolgen diese Tests teilautomatisiert mit einem Techniker als Bediener. Ergebnisse der Tests sicherheitskritischer Systeme (z. B. Airbag) werden entsprechend automatisiert dokumentiert. Wird ein Fehler im System gefunden, werden weitere Tests mit Hilfe des Komponenten-Experten spezifiziert, mit denen der Fehler eingegrenzt werden kann. Daraus folgen oft auch verbundunabhängige Funktionstests einzelner Komponenten am Simulator.

### **4.2 Testbeispiel**

Getestet wurde z. B. die Funktion der Fahrzeugentriegelung per Funkfernbedienung. Dabei muss das Lenkstockmodul das Funksignal empfangen, auswerten, die an der Entriegelung beteiligten beiden Steuergeräte über den CAN-Bus aufwecken und entsprechend ansteuern.

In bestimmten zeitlichen Konfigurationen (insbesondere bei schneller Abfolge Verriegeln - Entriegeln) wurde dabei der eigentliche Entriegelungsbefehl trotz korrekten Weckens von den ausführenden Steuergeräten aufgrund eines Softwarefehlers ignoriert. Dieser Implementierungsfehler wurde am HIL-Simulator gefunden und inzwischen behoben.

### **4.3 Betrachtung des Nutzens**

Wichtigster Vorteil der HIL-Simulation gegenüber dem „Bench Boat“ und dem realen Fahrzeugtest ist für Opel die sehr viel höhere Testfallabdeckung durch Automatisierung und die höhere Reproduzierbarkeit von Tests.

Schon kurz nach der Einführung des HIL-Simulators bei Opel stellt sich insbesondere der schnell erzielte Nutzen durch die einfache Eingabemöglichkeit der Tests (über ControlDesk MacroRecorder mit anschließender Modifikation der Aufzeichnungen und über eine Excel-basierte Maske) als sehr positiv heraus.

Innerhalb kurzer Zeit konnte Opel eine Auslastung des Simulators von mehr als 70% für automatisierte Tests während der Bürozeit erzielen. Zirka 20% der Zeit wird der Simulator für Konfiguration und Einrichtung neuer Testabläufe genutzt. Rund 10% der Zeit erfolgt eine Analyse detektierter Systemfehler im manuellen Betrieb des Prüfstands. Gelegentlich werden auch Über-Nacht-Tests gefahren.

Ein typischer Testdurchlauf enthält 10 bis 15 Bedienereingaben, die automatisch in Reihenfolge und zeitlichem Ablauf variiert werden. Je nach Komplexität bilden bis zu mehrere hundert solcher Testdurchläufe einen Teilttest zu Themen wie "Fahrzeug-Zugang", "Beleuchtung" oder "Wischer-Logik".

Die am Simulator gefundenen Fehler waren bisher überwiegend Implementierungsfehler. Oft erhält man vom Fahrzeug oder vom „Bench Boat“ her Hinweise auf mögliche Fehler, die erst am HIL-Simulator reproduziert und analysiert werden können. Die Häufigkeit der gefundenen Fehler sinkt relativ drastisch nach dem Abprüfen der bisherigen manuellen Tests. Erfahrungsgemäß werden mit Hilfe des HIL-Simulators Fehler entdeckt, die durch den Stichprobencharakter manueller Tests nicht aufgetreten wären.

Mit manuellen Tests wäre sehr wahrscheinlich oben genanntes Fehlerbeispiel der Fahrzeugentriegelung (siehe 4.2) nicht entdeckt worden. Im Versuchsfahrbetrieb tritt die relativ schnelle Abfolge Verriegeln - Entriegeln nur selten auf, mitunter würde das fehlerhafte Verhalten als Überschreiten der Funkreichweite gedeutet werden. Wenn Hunderttausende von Kunden aber das Fahrzeug nutzen, gibt es schnell eine Vielzahl dieser Fälle. Dieser Fehler hätte durchaus Potential zu massiven Kundenbeanstandungen gehabt.

Inzwischen geht Opel dazu über, die Gesamtfunktionalität der HIL-Simulatoren auf mehrere kleinere Simulatoren aufzuteilen, die für einen Verbundtest jederzeit gekoppelt werden können. Obwohl der HIL-Simulator ursprünglich zum reinen Test des Steuergeräteverbunds geplant war, hat sich nämlich immer stärker der Nutzen auch für die Überprüfung der Funktionalität einzelner Steuergeräte bzw. Komponenten herauskristallisiert. Ein Beispiel ist der Test der Eigendiagnosefunktionalität des Airbag-Moduls: Hier ist keine Verknüpfung zu anderen Steuergeräten erforderlich, jedoch ist hier aufgrund der sicherheitskritischen Relevanz ein durchgängiges automatisiertes und dokumentiertes Testen von Bedeutung. Ein separater HIL-Simulator für diese Komponente hat den Vorteil, dass gleichzeitig weitere Funktionalitäten im Parallelbetrieb getestet werden können.

Wichtig ist für Opel die Möglichkeit, die Testplattformen schnell und ohne externe Hilfe umzurüsten. Für die Zukunft geht man davon aus, dass ein HIL-Simulator für eine Fahrzeug-Plattform ca. 2-3 Jahre für den Funktionstest der Komponenten im Verbundsystem zur Verfügung stehen muss. In diesem Zeitraum sind kleinere Umbaumaßnahmen denkbar.

#### 4.4 Testen im gesamten Entwicklungszyklus

Nach ihren positiven Erfahrungen mit HIL-Tests möchte Opel wie viele andere Anwender dort nicht stehen bleiben. Der Wunsch taucht auf, automatisierte Tests auch in anderen, früheren Entwicklungsphasen durchzuführen. Gleichfalls wachsen die Anforderungen nach Verbesserungen bei der Testentwicklung und –verwaltung.

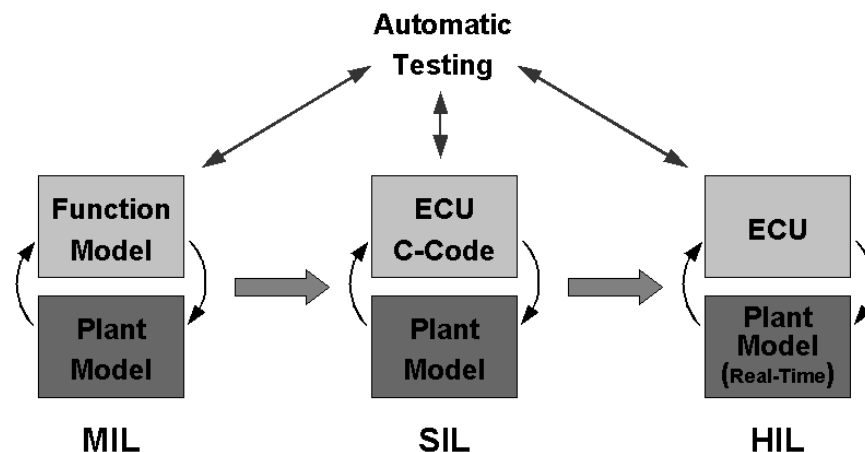


Bild 7 Automatische, modellbasierte Tests in verschiedenen Phasen des Steuergeräte-Entwicklungsprozesses.

Während HIL-Simulation und -Tests immer zumindest ein Prototypen-Steuergerät voraussetzen, kann in früheren Entwicklungsphasen getestet werden, sobald eine

Steuergeräte-Funktion als Simulationmodell vorhanden ist (z. B. in Simulink und/oder Stateflow implementiert). Dieses Funktionsmodell arbeitet gegen ein geeignetes Streckenmodell. Während das Funktionsmodell die eigentliche „Unit-under-test“ (UUT) ist, dient das Streckenmodell als virtuelle Umgebung für die UUT. Weil das Funktionsmodell mit der Regelstrecke in einem geschlossenen Regelkreis betrieben wird, wird dieser Schritt auch Model-in-the-Loop (MIL) genannt. Bereits in dieser frühen Phase lässt sich eine Vielzahl von Tests ausführen.

Im Gegensatz zu MIL wird in einem Software-in-the-Loop- (SIL-)System die UUT nicht durch ein Simulationsmodell realisiert, sondern bereits in Form des Produktions-Codes, der später im Steuergerät integriert wird. Dabei lässt sich das Verhalten des Steuergeräte-Codes mit dem des Funktionsmodells vergleichen.

Den letzten Schritt bildet die Hardware-in-the-Loop-Simulation wie oben beschrieben. Für einen effektiven Entwicklungsprozess ist es wichtig, dass die Funktionstests aus früheren Phasen bei der HIL-Simulation wiederverwendet werden können. Hinzu kommen weitere Tests, wie z.B. Diagnosetests oder Überprüfung der Kommunikation in vernetzten Systemen.

Testen in frühen Phasen, Wiederverwendbarkeit von Tests sowie Testerstellung und -verwaltung werden zukünftig durch ein neues integriertes Werkzeug – dSPACE AutomationDesk – unterstützt [4]. Die wesentlichen Features des Werkzeugs sind:

- Ein grafischer Sequenzeditor, der eine schnelle und effiziente Testerstellung ermöglicht,
- eine erweiterbare Automatisierungsbibliothek, die Basistestfunktionalitäten bereits zur Verfügung stellt sowie
- eine Projektmanager-Komponente für die Speicherung und Verwaltung großer Mengen von Tests, Testdaten und Testergebnissen in einer strukturierten Projektdarstellung.

AutomationDesk wird in enger Zusammenarbeit mit verschiedenen deutschen Automobilherstellern entwickelt. Erste Pilotanwendungen laufen bereits. Es ist geplant, AutomationDesk ab Mitte 2003 produktiv in Projekten einzusetzen.

## **5 Ausblick**

Der Nutzen der HIL-Simulation für den Test des Steuergeräteverbunds im neuen Opel Vectra zeichnete sich bereits sehr früh ab, ebenso wie die Tatsache, dass dieser Nutzen den notwendigen Zusatzaufwand für Aufbau und Pflege des Simulators sowie Testerstellung deutlich übersteigt. Neben der weiteren Erhöhung der Anzahl von automatisierten Hardware-in-the-Loop-Tests wird bei Opel daher die Definition von

Tests für frühe Steuergeräte-Entwicklungsstadien (Softwarespezifikation, Softwareimplementierung) als eine wesentliche Aufgabe der nahen Zukunft betrachtet. Diese Tests können dann in allen weiteren Entwicklungsphasen eingesetzt werden und reifen.

Neben der reinen Testerstellung beabsichtigt Opel, die Variantenvielfalt sowohl auf Seiten der Hardware als auch durch eine Vertiefung der Modellierung zu erhöhen (zusätzliche Chassis-Varianten, Motortypen, Getriebe, ...). Der Umbau des Simulators von der Epsilon-Plattform auf die Delta-Plattform ist nur ein erster Schritt in diese Richtung. Kurzfristig soll eine erweiterte Simulation der Bordnetzeinflüsse (Masseversatz, Spannungseinbrüche, Übergangswiderstände) sowie eine Anbindung des dSPACE-Systems als "Fahrer" an andere Prüfstände hinzukommen.

## 6 Literatur

- [1] D. Lemp  
Automatisierter HIL-Test der Karosserie-Elektronik  
dSPACE Anwenderkonferenz, Stuttgart, 2002
- [2] D. Lemp  
Opel Vectra Heading for its World Premiere  
dSPACE NEWS, 1/2002
- [3] [http://vectra.opel.com/brand\\_sites/vectra/launch/uk/en/downloads/pdfs/Spotlight\\_benchboat.pdf](http://vectra.opel.com/brand_sites/vectra/launch/uk/en/downloads/pdfs/Spotlight_benchboat.pdf)
- [4] K. Lamberg, J. Richert, R. Rasche  
A New Environment for Integrated Development and Management of ECU Tests. SAE 2003, Detroit, USA
- [5] S. Sinsel  
Control Development for Fuel Cell Vehicles  
dSPACE NEWS, 2/2000
- [6] H. Schütte, M. Plöger, K. Diekstall, P. Wältermann, T. Michalski  
Testsysteme im Steuergeräte-Entwicklungsprozess.  
Automotive Electronics 2001
- [7] J. Zehentbauer, M. Plöger, U. Louis  
Automatische Steuergerätestests auf Basis von Hardware-in-the-Loop Simulation. VDI-Berichte 1646