



Testen mit System – moderne Lösungen für die Hardware-in-the-Loop-Simulation

Der Autor



Dr. Klaus Lamberg ist als Produktmanager bei der dSPACE GmbH verantwortlich für die Produktstrategie, Produktplanung und Produkteinführung im Bereich HIL-Simulatoren und Test-Automatisierung.

Die Hardware-in-the-Loop- (HIL-) Simulation etabliert sich zunehmend als Meilenstein bei den Entwicklungsprozessen für die Automobil-Elektronik. HIL-Systeme und die dafür eingesetzten Produkte müssen daher verstärkt auf die konkrete Anwendung ausgerichtet werden. Im Vordergrund stehen dabei das schnelle und einfache Konfigurieren komplexer I/O-Funktionen, die effiziente Nutzung von Funktionen und Schnittstellen für die Automatisierung, sowie die Flexibilität und Skalierbarkeit von Einzel-Simulatoren bis hin zum Simulator-Netzwerk. Der vorliegende Beitrag beschreibt, wie die dSPACE GmbH diesen Herausforderungen begegnet.

1 Einführung

Bei der Entwicklung moderner Fahrzeugelektronik hat sich die Hardware-in-the-Loop-Simulation (HIL-Simulation) als integraler Bestandteil der Entwicklungskette etabliert und bewährt [1]. Dabei werden zu entwickelnde und zu testende elektronische Steuergeräte nicht im realen Fahrzeug verbaut, sondern an ein Simulationssystem angeschlossen, das die mechanische, elektrische, hydraulische und elektronische Umgebung des zu entwickelnden Steuergeräts in Echtzeit simuliert. Beispiele für die frühen Anwendungen der HIL-Simulation sind Motor-, Fahrdynamik- und auch Klimaregelungen. Mittlerweile werden jedoch sämtliche Steuergeräte einer Fahrzeugbaureihe mithilfe der HIL-Simulation getestet, weil der Gesamtverbund der Elektroniksysteme im Fahrzeug eine kaum noch zu beherrschende Gesamtkomplexität erreicht [2].

Mithilfe der HIL-Simulation lassen sich bis zu 90 % aller im Fahrversuch auftretenden Fehler nachbilden. Daher stellt sich das Kosten-Nutzen-Verhältnis bei der HIL-Simulation trotz einer auf den ersten Blick nicht gerade geringen Investition insgesamt sehr positiv dar. Eine Amortisierung ergibt sich erfahrungsgemäß schon innerhalb von drei bis sechs Monaten.

2 HIL-Technologie im Wandel

Die HIL-Technologie unterliegt derzeit einem Wandel. Die Leistungsfähigkeit von HIL-Simulatoren lässt sich nicht nur an

einzelnen Anwendungen messen. Gefragt sind mehr denn je HIL-Konzepte, die sich auf eine Vielzahl von Anwendungen abbilden lassen. Die heutigen, nachfolgend beschriebenen Herausforderungen gehen über die „klassische“ Problemstellung der Echtzeit-Simulation mit Signal-konditionierung und Lastnachbildung weit hinaus:

- Anwendungs- und lösungsorientierte Produkte
- Ausrichtung auf die Lösung automobilspezifischer Probleme
- Modulare, flexible und skalierbare Hardware
- Verfügbarkeit schlüsselfertiger, direkt anwendbarer Systeme
- Umfangreiche Automatisierungsmöglichkeiten
- Unterstützung automotiver Standards und Standard-Tools, wie ASAM MCD, MATLAB®/Simulink® usw.

Wichtig für den Anwender von HIL-Systemen ist nicht nur, dass er sein Steuergerät testen kann, sondern vor allem wie er dies tun kann. Anwendungsorientierte Produkte und lösungsorientierte Bedienmöglichkeiten müssen mit technischen Konzepten kombiniert werden, die in Bezug auf die Anwendung flexibel und skalierbar sind. Dadurch können die oftmals nicht unerheblichen Investitionen gesichert werden. Marktführer im Bereich von HIL-Systemen für den Test von Automobil-Elektronik ist die Firma dSPACE. Mit dSPACE Simulator [3] stehen moderne HIL-Systeme in unterschiedlichen technischen Ausprägungen zur Verfügung, **Bild 1**.

Summary

Modern Solutions for Hardware-in-the-loop- (HIL-) simulation

Hardware-in-the-loop- (HIL-) simulation is increasingly establishing itself as a milestone within automotive electronics development. HIL systems and products must therefore focus on automotive applications and typical automotive problems. Fast and easy configuration of complex I/O functions, efficient utilization of automation functions and interfaces, and flexibility and scalability of single simulators as well as of simulator networks are essential. This contribution therefore presents how dSPACE GmbH meets these challenges with modern HIL concepts such as dSPACE Simulator.

2 HIL-Technologie im Wandel



Bild 1: dSPACE Simulator – bewährte Lösungen für die Hardware-in-the-Loop-Simulation



3 Konfigurieren statt Programmieren

Ein typisches Beispiel für die Anwendung der HIL-Simulation stellt der Test von ESP-Steuergeräten dar [4]. So kann das Steuergerät einen Kurzschluss zur Versorgungsspannung nur während eines Regeleingriffs erkennen, weil die Ventilansteuerung mittels eines Low-Side-Schalters erfolgt. Um die Erkennungsfunktion zu testen, muss daher ein Fahrmanöver simuliert werden, bei dem eine Vollbremsung erfolgt. Dabei hat das gesamte Fahrzeugmodell verschiedene transiente, aber plausible Zustände zu durchlaufen. Solche Szenarien stellen enorme Anforderungen an die Fahrdynamiksimulation. Fahrdynamikmodelle wie ve-DYNA [5] von der Firma TESIS bieten dazu mehr als 50 Freiheitsgrade, die in Echtzeit gerechnet werden.

Ein weiteres Beispiel ist der Test von Motormanagementsystemen [6]. Die leistungsfähigen Regelalgorithmen erfordern sehr schnelle Closed-Loop-Reaktionen in Bezug auf Drosselklappenregelung, Einspritzung und Zündwinkel. Dies ist nur bei Verwendung eines entsprechend genauen Echtzeit-Simulationsmodells möglich. Typische Modell-Abstraten liegen bei 1 ms und darunter, wobei jedoch zylinderselektiv die Momentenverläufe in den einzelnen Zylindern nachgebildet werden müssen. Damit sind zum Beispiel Tests von Funktionen zur Aussetzererkennung als Teil des OBD- (Onboard Diagnose) Funktionsumfangs möglich.

Doch gerade die HIL-Simulation von Motoren und der Betrieb und Test realer Motorsteuergeräte stellen enorme Anforderungen an die I/O des Simulators. Dazu verwendet man heute spezielle I/O-Karten, beispielsweise das DS2210 HIL I/O Board von dSPACE. Dieses ist auf Motor- und Fahrdynamikanwendungen zugeschnitten. So sorgt eine spezielle Recheneinheit, die sogenannte Angular Processing Unit (APU), für die schnelle und auf den Kurbelwellenwinkel bezogene Erfassung von Einspritz- und Zündsignalen und erzeugt mit einer Auflösung von unter 0,1 Grad die entsprechenden Kurbel- und Nockenwellen-Sensorsignale.

Für den Anwender ist wichtig, dass die Konfiguration der APU und der gesamten I/O vollständig grafisch unter Simulink® erfolgt. Das ist deshalb sehr praktisch, weil das Motormodell selber in der Regel in Simulink® vorliegt. Die Entwicklungsumgebung MATLAB®/Simulink® stellt diesbezüglich nicht nur in der Automobilindustrie einen Quasi-Standard dar.

4 Signalkonditionierung – mehr als Pegelwandlung

Das DS2210 HIL I/O Board verfügt als „Automotive-I/O-Board“ von sich aus über die notwendige Signalkonditionierung. Die I/O-Kanäle des DS2210 berücksichtigen also bereits die besonderen Spannungsbereiche im Fahrzeug. Somit sind keine weiteren Maßnahmen zur Signalanpassung und Pegelwandlung notwendig.

Signalkonditionierung geht jedoch häufig über die notwendigen Maßnahmen zur Pegelanpassung zwischen Standard-I/O-Pegeln (typischerweise 0 bis 10 Volt oder –10 bis +10 Volt) und den im Automobil üblichen Spannungspegeln (0 bis 18 Volt für PKW) hinaus. Beispielsweise dient die Signalkonditionierung zur Aufbereitung relativ komplexer Ventilstromverläufe bei der HIL-Simulation von Otto- und Dieselmotoren mit Direkteinspritzung.

Genau für diese Anwendungen hat die dSPACE GmbH ein entsprechendes Signalkonditionierungsmodul entwickelt. Es ist in der Lage, verschiedene – per Software

einstellbare – Schwellwerte in Abhängigkeit vom Gradienten des Stromverlaufs zu detektieren. Somit kann das Modul zwischen der Boost- und der Hold-Phase der Ventilansteuerung unterscheiden. Am Ausgang erzeugt das Modul ein mit dem Kraftstofffluss korreliertes, binäres Signal. Dieses kann mit üblicher Standard-I/O bequem erfasst und ausgewertet werden.

Mithilfe des Moduls können die hohen Geschwindigkeits- und Genauigkeitsanforderungen bei der HIL-Simulation von Verbrennungsmotoren mit Direkteinspritzung erfüllt werden. Das Modul lässt sich – wie auch alle anderen Signalkonditionierungsmodule von dSPACE – in verschiedenen Simulatortypen einsetzen.

5 Voller Nutzen durch Test-Automatisierung

Die HIL-Simulation ist kein Selbstzweck. Der volle Nutzen erschließt sich erst durch die Automatisierung. Ein typisches Beispiel für die Automatisierbarkeit ist der Test von Diagnosefunktionen [7]. Dabei



Bild 2: Steuergeräte-Test mit integrierter Diagnoseschnittstelle

wird für jeden Pin des Steuergeräts und für jeden möglichen elektrischen Fehler der gleiche Ablauf durchfahren:

- Anfahren eines Betriebspunkts
- Anlegen des elektrischen Fehlers
- Rücknahme des Fehlers
- Auslesen des Steuergeräte-Fehlerspeichers
- Vergleich des Fehlerspeichereintrags mit dem Soll-eintrag
- Löschen des Fehlerspeichers
- Automatische Dokumentation der Ergebnisse.

Dieser Prozess muss nicht immer streng sequenziell ablaufen. Ob zum Beispiel vor Anlegen eines neuen Fehlers ein anderer Betriebspunkt angefahren werden muss, oder ob zum Löschen des Fehlerspeichers zuvor die Zündung auszuschalten ist, hängt von der konkreten Anwendung ab.

Wichtig für eine effiziente Bedienung des Testsystems ist, dass die Definition von Betriebspunkten, die Ansteuerung der elektrischen Fehlersimulation – häufig realisiert durch Relais – und der Zugriff auf den Diagnosespeicher nahtlos in den HIL-Simulator integriert sind. Der Zugriff auf den Diagnosespeicher des Steuergeräts kann beispielsweise durch die Integration eines Standard-Diagnosetools, wie des Diagnostic Tool Set (DTS, [9]) der Firma Softing, realisiert werden. Die Ansteuerung und Automatisierung erfolgt weiterhin aus der Bediensoftware des HIL-Simulators heraus, in diesem Fall ControlDesk von dSPACE, **Bild 2**.

Prüfzeiten lassen sich durch die Automatisierung derartiger Testabläufe um den Faktor zehn reduzieren [8]. Die Automatisierung ist natürlich nicht auf den Test von Diagnosefunktionen beschränkt. Im Gegenteil, der Grad der Automatisierung wächst ständig. Der automatisierte Betrieb – auch über Nacht und am Wochenende – ist mittlerweile üblich. Und der Test komplexer Formel-1-Steuergeräte ist aufgrund der kurzen Iterationszyklen zwischen den Rennen und aufgrund der Notwendigkeit, unerwünschte Seiteneffekte neuer Software-Strategien völlig ausschließen zu müssen, ohne die HIL-Simulation und ohne Testautomatisierung kaum noch möglich [10].

6 Vernetzte Simulatoren – das „Virtual Vehicle“

Häufig sind bereits mehrere Simulatoren für verschiedene Anwendungen wie Motor-, Getriebe- und Fahrdynamiksteuergeräte im Einsatz. Die entsprechenden Steuergeräte werden an diesen Systemen einzeln getestet; die nicht real vorhande-

6 Vernetzte Simulatoren – das „Virtual Vehicle“



Bild 3: Das „Virtual Vehicle“ im Einsatz

nen Steuergeräte werden simuliert (Restbussimulation). Aber auch hier gilt: Die Steuergeräte sind miteinander vernetzt. Außerdem wirken sie im Fahrzeug auf die gleiche Regelstrecke ein – das Fahrzeug. Sie sind also miteinander auf verschiedenen Ebenen gekoppelt und müssen deshalb auch in ihrer Gesamtheit getestet werden.

Optimal ist es, wenn die vorhandenen Simulatoren auch für den Test des vernetzten Gesamtsystems eingesetzt werden können. Dies ist genau dann möglich, wenn sie über sogenannte Gigalinks miteinander verbunden werden. Gigalinks sind Verbindungen für die Kopplung von schnellen dSPACE-Echtzeitsystemen. Der Datendurchsatz ist mit mehr als einem GBit/s höher als bei USB 2.0 oder Firewire (IEEE1394). Über Gigalinks tauschen die hochdynamischen Simulationsmodelle ihre Zustandsgrößen wie Motormoment und Motordrehzahl aus.

Wesentlich für die Kopplung von Simulatoren ist, dass der Projektgenieur die besondere Topologie des vernetzten Gesamtsystems sehr einfach innerhalb von Simulink® spezifizieren kann. Dazu verwendet er spezielle Blöcke des Real-

Time Interface for Multiprocessor Systems von dSPACE, welche die Gigalinks innerhalb von Simulink® grafisch repräsentieren. Die Echtzeitanwendung einschließlich der Echtzeitsynchronisation und des Datenaustauschs zwischen den Simulatoren wird damit auf Knopfdruck automatisch generiert.

Bild 3 zeigt einen aus vernetzten Einzelsystemen bestehenden HIL-Simulator [11]. Die Bedienung kann außer mit ControlDesk auch mit einem realen Fahrzeugcockpit erfolgen. Eine 3D-Animation wie MotionDesk [12] von dSPACE komplettiert die virtuelle Steuergeräteumgebung. Die Mehrfachnutzung von HIL-Simulatoren trägt somit wesentlich zum Investitionsschutz bei.

7 Zukünftige Herausforderungen

Die heutigen und zukünftigen Anforderungen im Bereich des Tests von Automobil-Elektronik erfordern flexible und auf die Anwendung ausgerichtete Lösungen. dSPACE Simulator bietet diesbezüglich nicht nur technische Vorteile. Wesentliche Stärken liegen in den folgenden Punkten:

■ HIL-Systeme als Teil einer modernen, auf MATLAB®/Simulink® basierenden Toolkette

■ Gezielte Ausrichtung der HIL-Technologie auf den Test von Steuergeräten und Steuergerätenetzwerken

■ Umfangreiche Erfahrung im Bereich des Tests von Automobil-Elektronik.

Der Stellenwert des automatisierten Testens wächst ständig. Test-Automatisierung wird verstärkt in frühen Phasen – zum Beispiel während der Funktionsentwicklung und -erprobung – eingesetzt und bleibt nicht nur auf die HIL-Simulation beschränkt. Dieses Vorgehen wird von dSPACE zukünftig mit dem Test-Automatisierungstool AutomationDesk gezielt unterstützt.

AutomationDesk wird die Testentwicklung und -durchführung in allen Entwicklungsphasen, angefangen bei der Model-in-the-Loop- über die Software-in-the-Loop- bis hin zur Hardware-in-the-Loop-Simulation durchgängig gestalten. Ein wesentlicher Schwerpunkt von AutomationDesk wird in der Strukturierung und

Verwaltung von Testprojekten, Testdaten und -ergebnissen liegen. Zusätzlich werden die effiziente, grafische Testentwicklung und die automatische Testdurchführung im Mittelpunkt der Arbeit mit

AutomationDesk stehen. Damit wird die führende Marktposition von dSPACE Simulator im Bereich des Tests elektronischer Fahrzeugsteuergeräte weiter gefestigt werden. ■

Literaturhinweise

- [1] Schütte, H.; Plöger, M.; Diekstatt, K.; Wältermann, P.; Michalsky, Th.: Testsysteme im Steuergeräte-Entwicklungsprozess. Automotive Electronics, pp. 16-21, March, 2001
- [2] Lemp, D.: Opel Vectra Heading for its World Premiere. dSPACE News 1/2002, Paderborn
- [3] dSPACE GmbH: dSPACE Simulator Product Information. dSPACE GmbH, Paderborn, 2001
- [4] Lamberg, K.; Wältermann, P.: Einsatz der HIL-Simulation zum Test von Mechatronik-Komponenten in der Fahrzeugtechnik. 2. Tagung Mechatronik im Automobil, HdT, München, 2000
- [5] TESIS Dynaware: Produktinformationen. <http://www.thesis.de>, München, 2002
- [6] Amorim, J.: Renault – Validation of Powertrain ECUs. dSPACE News 1/2002, Paderborn
- [7] Boot, R.; Richert, J.; Schütte, H.: Automated Test of ECUs in a Hardware-in-the-Loop Simulation Environment. CACSD, Kona, Hawaii, August 22-27, 1999.
- [8] Gühmann, C.; Riese, J.: Testautomatisierung in der Hardware-in-the-Loop Simulation. VDI-Berichte Nr. 1672, 2002
- [9] Softing AG: Produktinformationen. <http://www.softing.de>, München, 2002
- [10] Urban, P.: Toyota Motorsport Races with dSPACE. dSPACE News 3/2001, Paderborn
- [11] Gehring, J.; Schütte, H.: A Hardware-in-the-Loop Test Bench for the Validation of Complex ECU Networks. SAE 2002, Detroit, USA
- [12] dSPACE GmbH: Produktinformationen. <http://www.dspace.de>, Paderborn, 2002