



Virtual Bus

Reifegradabsicherung einer Omnibus-E/E-Architektur
mit HIL-Integrationstests



Ob Knickgelenk oder Doppeldecker, absenkbar, mit bis zu vier Doppeltüren und einer Vielzahl von Komfort- und Sicherheitssystemen, Stadt- oder Reisebus – die Varianten sind vielfältig. Dies wird auch beim Aufbau eines HiL-Teststandes offensichtlich, wo die verschiedenen Varianten berücksichtigt und möglichst schnell zwischen ihnen gewechselt werden soll. EvoBus, die MBtech Group und dSPACE haben gemeinsam ein solches Testsystem zur Steuergeräte-Validierung realisiert.

Als weltweit führender Omnibus-Hersteller ist das höchste Ziel, die Kunden zufriedenzustellen – eine hohe Produktqualität ist dafür unerlässlich. Im Omnibus-Bereich sind insbesondere eine hohe Verfügbarkeit der Fahrzeuge mit wenigen Ausfällen und eine hohe Lebensdauer wichtig. Um Innovationen frühzeitig auf den Markt zu bringen und dennoch nur ausgereifte und vorerprobte Systeme anzubieten, ist ein durchgängiger Entwicklungsprozess von der Spezifikation bis zur Freigabe unabdingbar. Eine Testkette mit hoher Testtiefe ist dafür elementar.

Die in Omnibussen verbauten mechanischen, pneumatischen, hydraulischen und elektrischen Systeme sind über eine zentrale Elektrik/Elektronik (E/E)-Architektur zur Steuerung und Regelung der Funktionen verbunden. Um die Integration der verschiedenartigen Systeme zu einem Gesamtfahrzeug-Verbund abzusichern, ist der HIL-Test des Gesamtsystems ein wichtiger Baustein im Entwicklungsprozess. Hier wird vor allem durch die Auto-

omatisierung der Tests ein hoher Mehrwert geschaffen.

Die Architektur eines modernen Reisebusses oder Stadtbusses muss in der Lage sein, die unterschiedlichsten Anforderungen zusammenzuführen. Das Spektrum reicht im Stadtbus von einer ausgeklügelten Steuerung des Gelenkes, die aktiv mit der Bremse, dem Motor, der Niveauregulierung, den Assistenzsystemen und den Instrumenten zusammenarbeiten muss, bis zu einer Multimediaanlage in einem Reisebus, die den Fahrgästen neben den unterschiedlichsten Unterhaltungsangeboten vielfältige Informationen über die Fahrt liefert. Diese vielfältigen Funktionen und Informationen sind über mehrere Systeme verteilt, müssen aber im Verbund reibungslos funktionieren. Dies muss bereits in einer sehr frühen Entwicklungsphase, bevor die Systeme in einem Fahrzeug verbaut werden, gewährleistet sein und stellt entsprechende Anforderungen an die Testumgebung und die Teststrategie.

Testumgebung und Testfokus

Für die Funktions- und Diagnostetests der Steuergeräte auf Komponenten- und Verbundebene ist ein Hardware-in-the-Loop (HIL)-Simulator vorgesehen. Der besondere Fokus während der HIL-Simulationen liegt auf dem Test der omnibusspezifischen Systeme sowie dem Zusammenspiel der Funktionen der verschiedenen Komponenten. Wenn möglich, werden hierfür Übernahmepotenziale aus anderen Konzernbereichen genutzt. So sind Teile des HIL-Prüfstandes inklusive der Simulationsmodelle Kopien anderer Prüfstände. Allgemeine Testfallbibliotheken sowie die Testspezifikationen wurden an die Anforderungen von EvoBus angepasst.

Herausforderung Variantenvielfalt

Neben der Integration vieler verschiedener Systeme und Funktionen stellt die hohe Anzahl von Kundenwünschen eine Herausforderung der Omnibus-Entwicklung dar. Sie erfordert sehr kurze Entwicklungszeiten

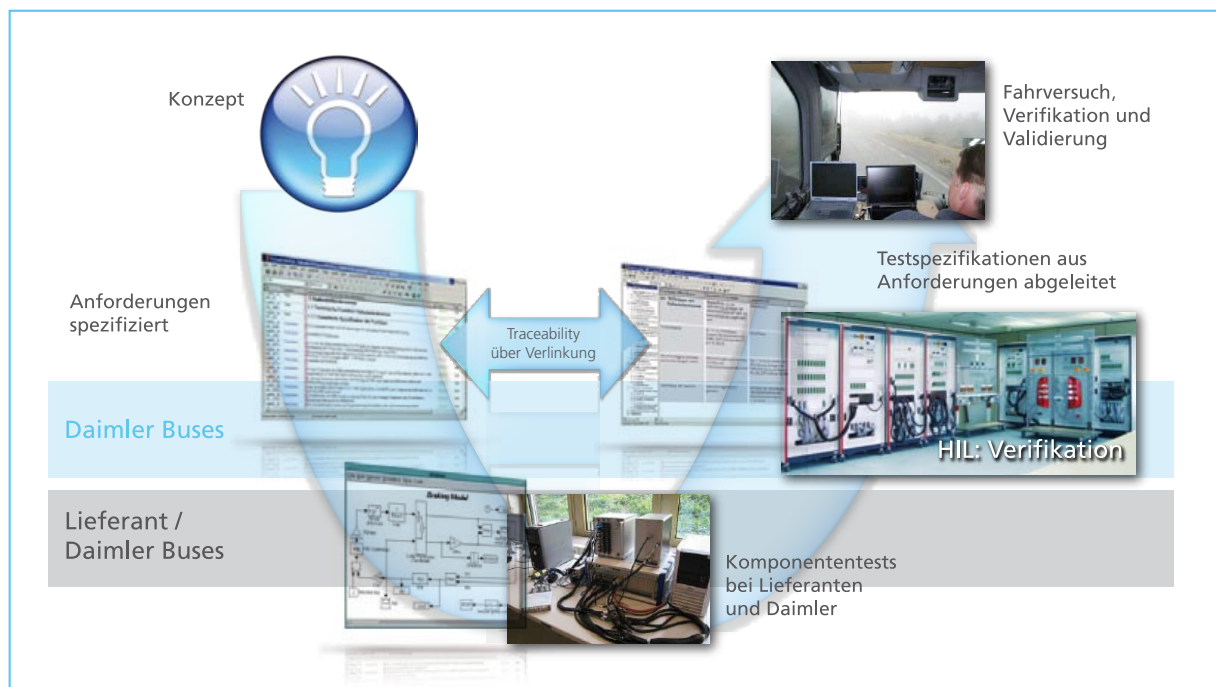


Abbildung 1: Die HIL-Simulation ist ein fester Bestandteil des EvoBus-Entwicklungsprozesses.



für die Software-Module. Von den ersten Anforderungen bis zu Freigabe und Einsatz im Kundenfahrzeug sollten nur einige Wochen für Entwicklung und Tests vergehen. Gleichzeitig stellt die EvoBus-Omnibus-E/E-Architektur einen „Baukasten“ für alle Integral-Omnibusse in Europa dar. Hieraus werden die Architekturen für alle Fahrzeuge vom einfach ausgestatteten Bus bis hin zum High-End-Doppelstock-Reisebus oder einem Stadtgelenkbus mit 20 m Länge erstellt. Diese Variantenvielfalt spiegelt

(Abbildung 1). Tests auf Steuergeräte- und Steuergeräte-Software-Ebene werden weitestgehend von Lieferanten durchgeführt und von EvoBus durch ein Lieferantenmanagement abgestimmt und überwacht. Vor den ersten integrativen Tests am Gesamtintegrationsprüfstand werden zusätzlich interne Komponententests, die die Netzwerk- und Diagnosefähigkeit nachweisen, durchgeführt. Ihre Ausprägung ist vom jeweiligen Reifegrad des Systems und der eigenen Software-Anteile abhängig. Schwerpunkt

übernommen, der Betrieb sowie die Modellerstellung von MBtech. Eine zusätzliche Herausforderung ist die standortübergreifende Entwicklung, wodurch die jeweiligen Entwickler häufig nicht vor Ort sind. Dies erfordert einheitliche Vorgehensweisen, klar definierte Prozesse, eine durchgängige Dokumentation und ständige Kommunikation der Beteiligten.

Technischer Aufbau des HIL-Testsystems

Für die Tests der Funktionen und Steuergeräte wurde ein vollständiger Verbund der Systeme mit 8 HIL-Simulator-Racks nachgebildet (Abbildung 2). Sie umfassen die Domänen Antriebsstrang, Innenraum und Fahrgestell. Dieser Gesamtintegrationsprüfstand erlaubt eine Nachbildung aller europäischen Integralbusse von EvoBus. Der Gesamtaufbau besteht aus zwei Multiprozessorsystemen: 4 dSPACE Simulator Full-Size-Racks zur Simulation des Antriebsstrangs mit 5 Prozessorkarten zur Berechnung des Umgebungsmodells und 4 Full-Size-Racks mit 4 Prozessorkarten für den Innenraum. Die Tests für die Fahrgestell-Steuergeräte wurden in die 8 Racks mit integriert. Die Kommunikation zwischen den Simulatoren erfolgt über Gigalink-Verbindungen. Zur Verteilung der Gesamtrechenlast auf die Prozessoren kann das Umgebungsmodell partitioniert und jede Partition einem Prozessorknoten zugeordnet werden. Insgesamt lassen sich ca. 45 Steuergeräte mit 2800 Pins anschließen.

Aktuell werden die Innenraum-Simulatoren um zwei zusätzliche Full-Size-Racks erweitert, um die Simulation zusätzlicher Systeme zu ermöglichen. Nach der Erweiterung stehen insgesamt 10 Prozessorrechenkerne zur Verfügung, um wahlweise das Modell eines Stadtbusses oder eines Reisebusses zu berechnen. Teil des Simulatorkonzepts ist es, Bus-Komponenten als Echtlasten in

„Durch den frühen Einsatz der Hardware-in-the-Loop-Simulation im Entwicklungsprozess sind wir in der Lage, den Reifegrad der Steuergeräte frühzeitig zu bestimmen und abzusichern.“

Ian Suckow, EvoBus GmbH

sich in der umfangreichen Parametrierung der Steuergeräte und den Steuergeräte-Varianten wider oder erfordert teilweise sogar ganz unterschiedliche Steuergeräte, beispielsweise für verschiedene Getriebearten. Der HIL-Testingenieur muss daher am HIL-Prüfstand innerhalb kurzer Zeit zwischen verschiedenen Fahrzeugvarianten umschalten können, das heißt, das Modell, der Steuergeräte-Verbund und die Parametrierung müssen anpassbar sein.

Motivation der HIL-Integrationstests

EvoBus richtete im Bereich E/E und Diagnose seine Entwicklungsprozesse an den Prozessmodellen von CMMI aus, um eine hohe Produktqualität zu erreichen. Hierbei geht es um die Einhaltung optimaler Standardprozesse und deren kontinuierliche Verbesserung. Bestandteil der Verbesserungsmaßnahmen ist eine durchgängige Testkette im rechten Ast des V-Entwicklungsprozesses

der integrativen Tests ist die Verifikation von systemübergreifenden Funktionen.

Anforderungen an Testsystem und Testbetrieb

Grundvoraussetzungen für einen reibungslosen Testbetrieb sind eine zuverlässige Hardware und schneller Support bei auftretenden Problemen. Das Testsystem muss bei zusätzlichen Anforderungen oder neuen Systemen flexibel erweiterbar sein. Ziel von EvoBus war die Vergabe des gesamten Testbetriebs inklusive Prüfstands-aufbau, Wartung, Modellierung, Testimplementierung und Testdurchführung an einen zentralen Betreiber und Ansprechpartner. Dieser ist für einen reibungslosen Betrieb des HIL-Systems verantwortlich. EvoBus liefert die Testspezifikationen; die Bewertung der Testergebnisse erfolgt gemeinsam zwischen dem HIL-Tester und den Funktionsverantwortlichen. Komponenten-Spezifikation und Aufbau des HIL-Testsystems wurden von dSPACE

die Simulation einzubeziehen. Sie sind über Komponententräger mit dem Simulator verbunden. Zu den Echtlasten gehören das Druckluftsystem der Bremsen, die Beleuchtungseinrichtung, Teile der Getriebe sowie Klappen und Ventile des Motors. Für den reibungslosen Betrieb des HIL-Systems stellte dSPACE dem HIL-Betreiber MBtech eine umfangreiche Dokumentation der Hardware zur Verfügung.

Bremssimulation mit Echtlasten

Das Bremssystem besteht aus einem Zentralmodul und Achsmodulatoren für die drei vorhandenen Achsen. Die Steuergeräte sind sowohl untereinander als auch mit dem ESP (elektronisches Stabilitätsprogramm) über 4 CAN-Busse vernetzt. Mittels einer Switch-Matrix und des dSPACE DS4302 CAN Interface Boards können

sämtliche CAN-Verbindungen individuell aufgetrennt und über eine Restbussimulation betrieben werden. Für die Echtzeitsimulation der Bremse wurde ein Echtlastträger an den Simulator angeschlossen, der die Bremspneumatik mit Originalventilen und -sensoren enthält (Abbildung 3). Alle 32 Drucksensoren und 20 Ventile der Bremsanlage wurden so an die Echtzeitsimulation angeschlossen. Eine realitätsnahe Simulation des gesamten Druckluftsystems wäre hier wesentlich aufwendiger.

Abbildung des Antriebsstrangs

EvoBus bietet für seine Busse drei Getriebetypen an: Automatikgetriebe mit Wandler, automatisierte Schaltgetriebe und Handschalter. Die Steuergeräte für die entsprechenden Getriebevarianten werden über kodierte Kabelbäume an den Simulator

angeschlossen. Es ist somit ausreichend, die I/O-Ressourcen am Simulator lediglich einfach vorzuhalten und die Steuergeräte trotzdem mit ihren spezifischen Echtlasten zu betreiben. Ein Umbau des Testsystems von einer Getriebevariante auf eine andere bedeutet nur wenige Handgriffe und den Wechsel des Simulationsmodells.

Komponenten des Innenraums und des Fahrwerks

Zum Test der Innenraum-Steuergeräte wurden für die Echtzeitsimulation sämtliche busspezifischen Komponenten bereitgestellt:

- Klimaanlage mit einer variablen Anzahl von Unterstationen
- Variable Anzahl Türsteuerungen mit pneumatischem oder elektrischem Antrieb

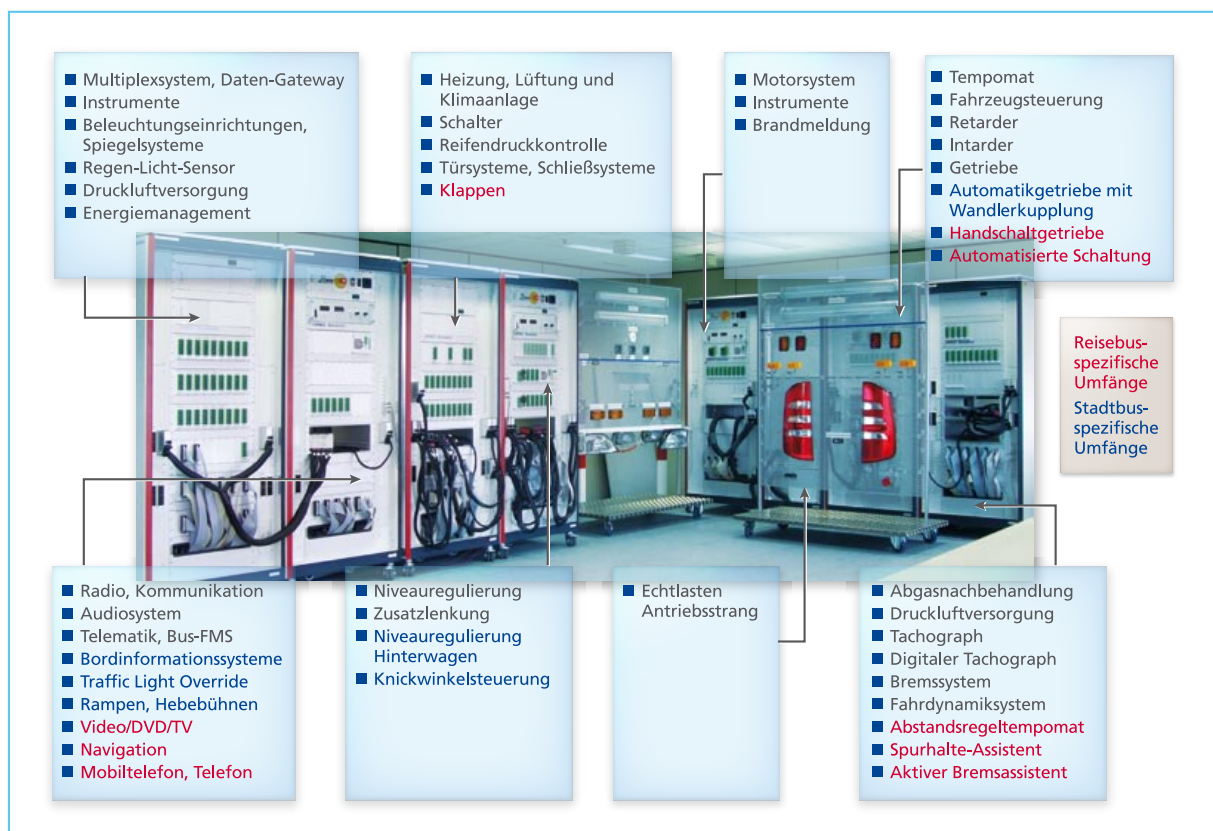


Abbildung 2: Der vollständige HIL-Teststand umfasst 8 Full-Size-Racks und Komponententräger für die Beleuchtungs- und Bremsanlage.

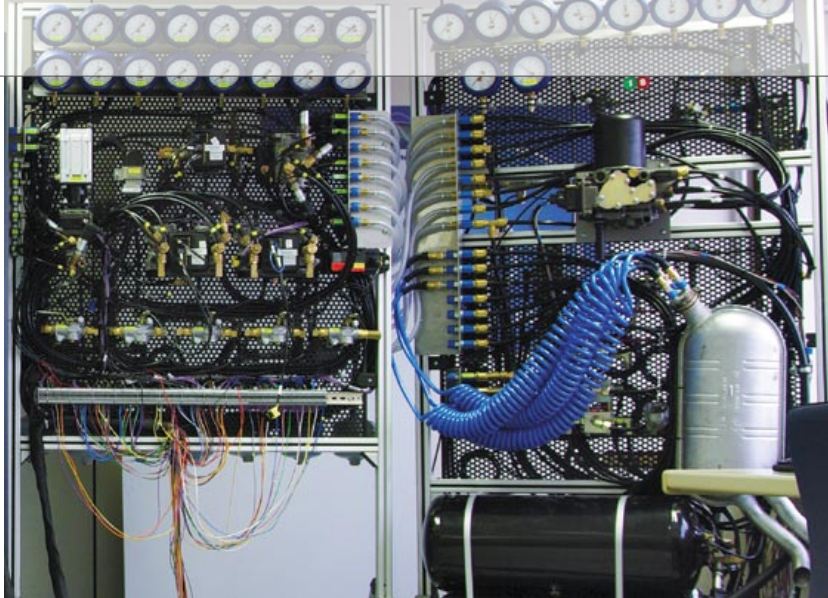


Abbildung 3: Der komplette Druckluftaufbau der Bremsen wurde mit Originalventilen aufgebaut.

„Gemeinsam mit anderen Testinstanzen wie Lieferantentests, internen Komponententests und Vorerprobungsfahrzeugen wird durch die HIL-Tests eine hohe Systemreife für die Prototyperprobung und eine hohe Testtiefe erreicht.“

Ian Suckow, EvoBus GmbH

- Elektronisch geregelte Luftfederung und Dämpfung
- Elektronisch-hydraulische Zusatzlenkung für die dritte Achse
- Knickwinkelsteuerung für Gelenkbusse
- 6 MUX-Module, deren Ein- und Ausgänge weitgehend frei digital, analog, kontinuierlich oder mittels PWM (Pulsweitenmodulation) konfiguriert sein können.

Insgesamt wurden an den Innenraum-Simulatoren 1300 Steuergeräte-Pins angeschlossen. Davon werden an 672 Pins Sensoren oder Aktoren simuliert, an ihnen ist eine elektrische Fehlersimulation möglich. Offene Leitungen, Kurzschlüsse gegen die Versorgung oder gegen andere Pins sowie Kurzschlüsse über variable Widerstände können damit geschaltet werden.

Die MUX-Module stellen mit ihren variablen Funktionen eine besondere Herausforderung dar. Hierbei handelt es sich um busspezifische Steuergeräte, mit denen die vielen elektri-

schen Verbraucher gesteuert werden, beispielsweise Dachluken, Bordnetzmanagement, Teilfunktionen der Türsteuerung und der Niveauregelung, alle Fahrzeugleuchten, Kaffeemaschinen oder Würstchenkocher. Jedes Modul kann an den Ausgängen Dauerströme bis zu 10 A treiben und an den Eingängen Tri-State- oder analoge Pegel auswerten. Für die Fehlersimulation wurden daher im Simulator die Pins eines MUX-Moduls mit einer hochstromfähigen FIU (Failure Insertion Unit) ausgestattet, die pro Kanal Fehlerströme von bis zu 50 A schalten kann. Zudem ist die Steuergeräte-Topologie je nach Fahrzeug variabel. Die MUX-Module können daher über eine Schaltermatrix automatisch mit unterschiedlichen Fahrzeug-CAN-Bussen verbunden werden.

Besonderheiten eines Omnibus-Umgebungsmodells

Für umfassende Funktions- und Integrationstests aller Testobjekte in einer adäquaten Simulationsumgebung sind realistische Umgebungs- und Streckenmodelle unerlässlich. Hierzu

Glossar

Achsenmodulator – Dient zur Umsetzung des Sollbremsdrucks an den Achsen.

CMMI (Capability Maturity Model Integration) – Systematische Aufbereitung von Prozessen und Praktiken zur Verbesserung des Ablaufes. Reifegrad 3 bedeutet, dass Projekte nach einem angepassten Standardprozess durchgeführt werden und es eine organisationsweite kontinuierliche Prozessverbesserung gibt.

MUX-Modul – Flexibel programmierbares Steuergerät.

Tri-State – Digitale Schaltungselemente, deren Ausgänge nicht nur zwei (0 und 1), sondern zusätzlich noch einen dritten Zustand annehmen können, der als hochohmig bezeichnet wird.

müssen alle Teilsysteme des Fahrzeugs einbezogen werden, also Antriebsstrang, Fahrgestell und Innenraum. MBtech war für die initialen Umgebungsmodelle, die im späteren Testbetrieb um neue Funktionen erweitert wurden, sowie für deren Wartung verantwortlich. Das Basismodell für den Stadtbus besteht aus zwei identischen Grundmodellen für Vorder- und Hinterwagen, die durch ein Gelenk verbunden sind. Wichtige Aspekte des Fahrgestellmodells sind Funktionen der Knickwinkelsteuerung, der Zusatzlenkung und der Niveauregulierung. Der Reisebus hingegen wurde als Einzelwagen modelliert, so dass sich seine Fahrgestellnachbildung deutlich vom Stadtbus unterscheidet. Das Motormodell basiert auf einzelnen Kennlinienmodellen für Schlepp-, Starter-, Brems- und Motormoment, die zu einem Gesamtmoment summiert werden. Da das Bremsystem durch Echtlasten und einen realen Druckkreislauf nachgebildet wird, erfolgt lediglich die Berechnung des resultierenden Bremsmoments



sowie die Anbindung an den modellierten Antriebsstrang im Umgebungsmodell.

Ein wesentliches Merkmal von Omnibussen sind die verschiedenartigen Türen mit einer hohen Varianten- und Funktionsvielfalt, zum Beispiel eine elektrische oder pneumatische Ansteuerung. Sie haben in öffentlichen Verkehrsmitteln eine besondere Verfügbarkeitsrelevanz. Zusätzlich enthält das Simulationsmodell Nachbildungen des Klimasystems, der Schalter und des Regen-Licht-Sensors.

Testprozess

Das Vorgehen bei der Testumsetzung orientiert sich am Referenzprozess PROVEtech:TP5. Er besteht aus fünf Teilschritten:

- **Teststrategie:** Hauptziel ist es, aus der Detailsicht heraus eine Gesamtsystemsicht zu erhalten und verteilte Funktionen zu identifizieren und zu priorisieren. Hier wird übergreifend festgelegt, welche Testziele für die jeweiligen Teststufen im Fokus stehen.
- **Testplanung:** Zuordnung von Testthemen für den Integrationstest unter Berücksichtigung von Testaktivitäten anderer Testfraktionen, beispielsweise Steuergeräte-Lieferanten oder spätere Fahrversuche.
- **Testspezifikation:** Diese wurden bereits vor dem Aufbau des Testsystems begonnen und liefern ausformulierte Testfälle für verschiedene Funktionen, die als Arbeitsgrundlage für die HIL-

Betreibermanschaft dienen. In einer standortübergreifenden Entwicklung stellen sie zudem die unerlässliche Kommunikationsbasis zwischen Entwickler und Tester dar.

- **Testrealisierung:** Auf Basis der Testspezifikationen werden automatisierte Tests erstellt.
- **Testauswertung:** Gefundene Fehler werden in einer zentralen

Testautomatisierung automatisierter Steuergeräte-Tests. Hierzu gehören neben der kontinuierlichen Inbetriebnahme neuer Steuergeräte-Funktionen auch die Erweiterung und Wartung der HIL-Hardware, die Anpassung und Weiterentwicklung der Umgebungsmodelle sowie die Betreuung der Arbeiten am Testsystem, beispielsweise bei Messungen oder interaktiven Tests. Einer der Engpässe bei der Testautomatisierung ist die erstmalige Durchführung eines Tests mit dem beteiligten Steuergeräte-Verbund. Dies kann je nach Komplexität des Testfalls beziehungsweise der Steuergeräte-Funktionen langwierig sein und vollen Zugriff auf das Testsystem erfordern. Hierbei zahlt sich die Modularität des HIL-Systems aus, da die Teilsysteme

„Die vielfältigen Möglichkeiten Testsysteme und Testfälle wiederzuverwenden, erleichtern die Einführung aufwendiger Verbundsimulatoren auch bei neuen Projekten.“

Stefan Abendroth, MBtech Group

Auffälligkeitenliste verwaltet, die direkt mit den zugehörigen Anforderungen, Testspezifikationen und Testergebnissen verknüpft ist. Fehler, die die Lieferanten betreffen, werden mitgeteilt und Termine und Maßnahmen zur Behebung abgestimmt.

Die Status aller Testaktivitäten und Fehlerbehebungen werden regelmäßig in einem Bericht zusammengefasst, so dass eine hohe Transparenz bezüglich der aktuellen Fortschritte und des Systemreifegrades auf allen Hierarchieebenen vorhanden ist.

Testautomatisierung

Hauptaufgabe der MBtech-Betreibermanschaft am Integrationsprüfstand ist die Umsetzung und Durchfüh-

für Innenraum/Fahrgestell und für den Antriebsstrang getrennt sind und dadurch parallel betrieben werden können. Die Programmierung automatisierter Tests (Abbildung 4) erfolgt zunächst unabhängig vom Testsystem, so dass die Entwicklung von Testfällen und die sonstige Systembetreuung zeitgleich möglich sind.

Testwiederverwendung

Bei Modellwechseln vom Stadtbus zum Reisebus sowie für verschiedene Fahrzeugvarianten sollen möglichst viele der einmal erstellten und geprüften Testfälle wiederverwendet werden. Um dies zu erreichen, liegt der Testautomatisierung ein im Daimler-Konzern bewährtes Bibliothekskonzept zugrunde, in dem fahrzeugspezifische Testanteile



*Links: Ian Suckow, EvoBus GmbH, Deutschland
Ian Suckow ist Projektleiter für Integrations- und Systemtest bei EvoBus in Mannheim und Neu-Ulm.*

*Mitte: Stefan Abendroth, MBtech Group, Deutschland
Stefan Abendroth leitet das Kompetenzfeld Commercial Vehicle Testing der MBtech Group in Sindelfingen.*

*Rechts: Martin Müller, dSPACE GmbH, Deutschland
Martin Müller plant und entwirft individuell auf den Kunden zugeschnittene HIL-Simulatoren bei dSPACE im Projektzentrum Stuttgart.*

beschrieben sind. Somit sind die gleichen Tests für andere Fahrzeugvarianten ebenfalls nutzbar, indem man an zentraler Stelle im Test Fahrzeuggrunddaten austauscht. Langfristig erhöht sich hierdurch die Effizienz bei der Testumsetzung und einzelne Testergebnisse lassen sich besser vergleichen.

Erfahrungen nach einem Jahr Testbetrieb

Der Integrationsprüfstand war im ersten Jahr seines operativen Einsatzes diejenige Testinstanz, bei der die verschiedenen Steuergeräte der neuen E/E-Plattform zum ersten Mal vernetzt wurden und miteinander interagierten. Diese erste Gesamtintegration zusammen mit der Inbetriebnahme des Testsystems war die erste Bewährungsprobe. An den Testobjekten konnten in dieser Phase bereits Auffälligkeiten identifiziert

und analysiert werden. Im ersten Jahr wurden alle Systeme erfolgreich im Closed-Loop-Betrieb betrieben, einschließlich der sehr anspruchsvollen Teilsysteme Antriebsstrang und Fahrwerk mit aufwendigen Umgebungsmodellen. Auf diese Weise sind virtuelle Testfahrten unter Laborbedingungen realisierbar, bis hin zum Bremsengriff mit ABS oder komplexen Fahrmanövern. Im operativen Betrieb werden vorher spezifizierte Testfälle implementiert und automatisiert durchgeführt. Neue Musterstände der Steuergeräte und Bugfixes werden automatisierten Regressionstests unterzogen. Durch die Testergebnisse am Simulator wird eine frühzeitige Funktionsabsicherung des Gesamtverbundes mit hoher Testtiefe erreicht. Der durch den gesamten durchgängigen Entwicklungsprozess gesteigerte Reifegrad des Systemverbundes führt zu

einer deutlichen Entlastung im Testbetrieb der Prototyp-Fahrzeuge und verspricht eine hohe Produktqualität für die Serie. In Verbindung mit einem Betreibermodell für das operative Testen, das den Steuergeräte-Entwicklern den Betrieb des sehr komplexen Testsystems abnimmt, wurde erreicht, dass der HIL-Integrationstest in der Omnibus-E/E-Entwicklung einen festen Platz einnimmt.

Der Integrationsprüfstand wird aktuell für den Test von zusätzlichen Systemen in Reisebussen erweitert. Für die Zukunft ist bei EvoBus der HIL-Test von zusätzlichen Sicherheitssystemen und alternativen Antrieben wie Hybrid- oder Brennstoffzellen-Funktionalitäten in Vorbereitung. ■

*Ian Suckow, Daimler Buses - EvoBus GmbH
Stefan Abendroth, MBtech Group
Martin Müller, dSPACE GmbH*

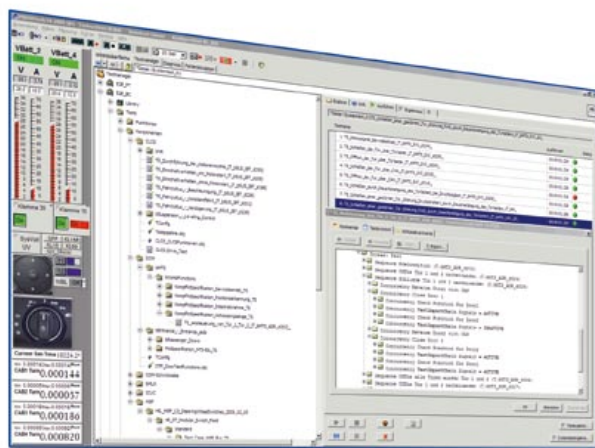


Abbildung 4: Die Test-Software PROVetech:TA von MBtech.

Fazit

- Die HIL-Simulation wird parallel zur Steuergeräte-Entwicklung für eine Omnibus-E/E-Architektur eingesetzt.
- Das gute Zusammenspiel zwischen Umgebungsmodell und Simulator-Hardware ermöglicht frühe virtuelle Testfahrten.
- Eine Vorverlagerung der Fehlerfindung im Testprozess verkürzt die Entwicklungs- und Testzeiten.