

Touareg Hybrid – faszinierend elektrifiziert

Funktionsintegrationstest für einen hybridisierten Antriebsstrang
bei Volkswagen – im Team liegt die Kraft!





Der neue Volkswagen Touareg steht ab sofort auch in einer Hybrid-Variante zur Verfügung. Der elektrische Antrieb, die Leistungselektronik und die Traktionsbatterie lassen die Komplexität der vernetzten, elektronischen Systeme sprunghaft ansteigen. Von der Funktionsentwicklung bis zum Freigabetest der Steuergeräte setzt Volkswagen konsequent auf die Hardware-in-the-Loop (HiL)-Simulation, um die Funktionalität und Qualität zu sichern.

Der neue Volkswagen Touareg

Bereits die erste Auflage des Volkswagen Touareg setzte mit seinen innovativen Fahrzeugfunktionen Maßstäbe bei der Erfüllung hoher Komfort- und Sicherheitsansprüche. Dazu gehörten beispielsweise die automatische Abstandsregelung (ACC), der Spurwechselassistent (SWA) oder die Rückfahrkamera „Rear Assist“.

Mit der Neuauflage des Touareg wird die Unternehmensstrategie weiterverfolgt, kundenorientierte Innovationen in Serie zu bringen und diese im nächsten Schritt auf die breite Fahrzeugflotte im Konzern zu übertragen. Neben weiterentwickelten Assistenzsystemen, wie beispielsweise einem Pre-Crash-System, das die Daten der Radar-

und Videosensoren auswertet, wird der Volkswagen Touareg erstmals auch mit einem Hybrid-Antriebsstrang angeboten (Abbildung 1). Der als Voll-Hybrid ausgelegte Antriebsstrang stellt dabei hohe Anforderungen an die Funktions- bzw. Steuergerätevernetzung. Für den Fahrzeughersteller bedeutet dies einen hohen Anspruch an die Systemintegration. Er ist verantwortlich für das Gesamtfahrzeug und muss dafür sorgen, dass die Systeme, die zum Teil von verschiedenen Zulieferern stammen, fehlerfrei und robust im Gesamtfahrzeug funktionieren.

Motivation für einen HiL-Prüfstand

Die daraus abgeleitete Erkenntnis, eine vernetzte Hardware-in-the-Loop



(HIL)-Prüfungsumgebung zu schaffen, ergab sich aus zwei Anforderungen:

- Die Integrationserprobung vernetzter Steuererätfunktionen, insbesondere der Hybridfunktionen, muss schnell und dynamisch mit den realen Steuergeräten darstellbar sein.
- Aufgrund der, insbesondere in frühen Entwicklungsphasen, in geringer Anzahl verfügbaren Prototypen, muss ein Prüfplatz als entwicklungsbegleitende Instanz für Zulieferer und Fachabteilungen für Funktionsentwicklung und Sondererprobung zur Verfügung stehen.

Auswahl des HIL-Prüfstands

Volkswagen setzte für den Touareg Hybrid als erste Marke im Volkswagen Konzern einen vernetzten HIL-Simulator zum Test eines Hybridantriebsstranges ein. Diese Tatsache erforderte einen starken Partner mit umfassender Erfahrung im Bereich von Steuergeräten und der Simulation von Elektroantriebskomponenten, wodurch die Wahl auf dSPACE fiel. Besonders in den Erprobungsphasen früh im Entwicklungsprozess sind die Steuergeräte noch nicht vollständig diagnose- und funktionsfähig. Diese Tatsache erschwert die Inbetriebnahme am Simulator und wird idealerweise durch die Erfahrungen des HIL-Entwicklungspartners kompensiert. Die Kompetenz im Bereich der neuen, innovativen

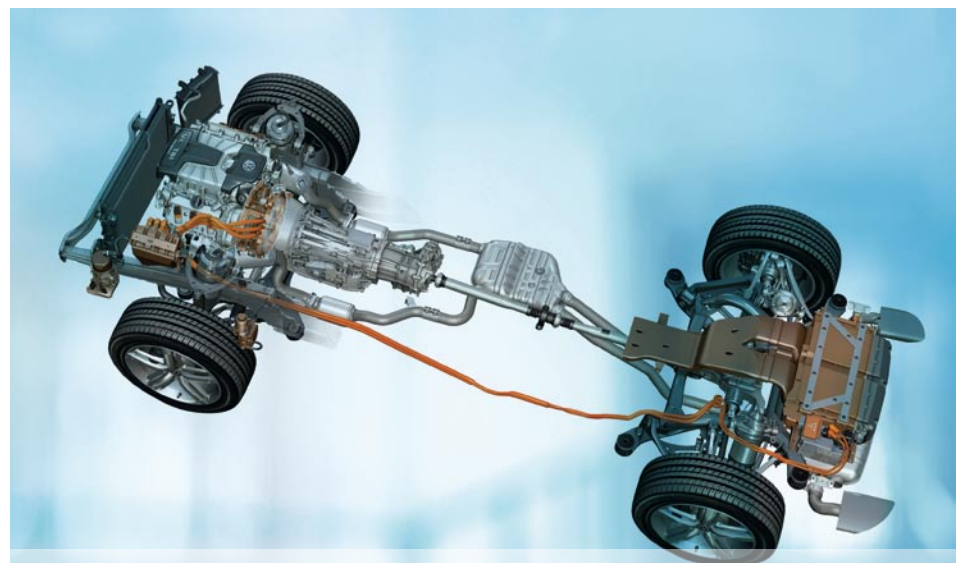
Bussysteme wie FlexRay rundete die Entscheidung für dSPACE als Erprobungspartner ab.

Prozess zur Integrationserprobung und Testfallerstellung bei Volkswagen

Um die Komplexität der verteilten Fahrerassistenzfunktionen im Gesamtfahrzeug zu bewältigen, wird neben den Arbeiten an realen Fahrzeugen und Prüfständen bei Volkswagen konsequent auf die Hardware-in-the-Loop-Simulation gesetzt. In einem mehrstufigen Testprozess wird zu festen Zeitpunkten des Produktentstehungsprozesses (PEP) der Gesamtstatus des Fahrzeugs am Integrations-HIL-Prüfstand betrachtet. Diese Prüfungen sind Bestandteil des

Gesamtintegrationstests (GIT). Die Wechselwirkungen und übergreifenden Funktionen der Systeme können so mit hoher Testabdeckung bereits in frühen Entwicklungsphasen untersucht und abgesichert werden. Zur Ermittlung des aktuellen Fahrzeugreifegrades bezüglich der Systemintegration werden im GIT je nach Prüfaufgabe verschiedene Prüforte, wie Prototypenfahrzeuge oder Prüfstände, verwendet, deren gebündelte und konsolidierte Testergebnisse ein detailliertes Monitoring des Gesamtintegrationsstatus des Fahrzeugs ermöglichen. Die Auswahl der jeweiligen Prüforte für die erforderlichen Tests erfolgt nach deren Eignung und Verfügbarkeit aus dem zur Verfügung stehenden Elektro-

Abbildung 1: Der hybridisierte Antriebsstrang samt Batteriemodul des Touareg.



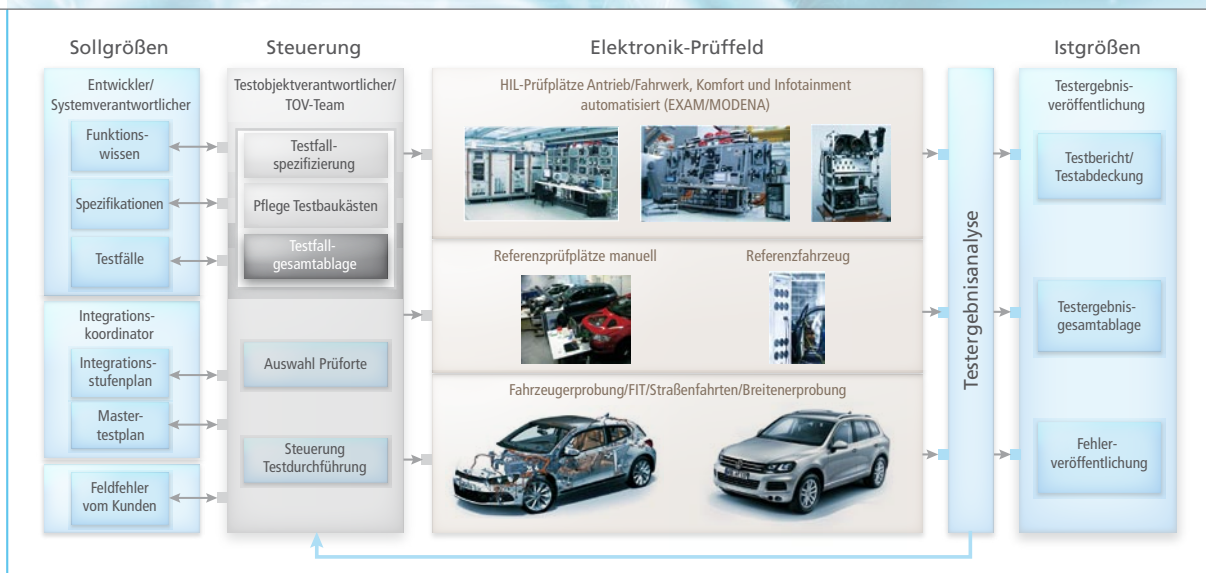


Abbildung 2: Aufbau des Elektronik-Prüffeldes.

nik-Prüffeld (Abbildung 2). Am HIL-Prüfstand werden Steuergerätestests durchgeführt, die schwerpunktmäßig ausgewählte Testthemen umfassen (Tabelle 1). Weiterhin unterstützen die HIL-Tests die systematische Analyse von Auffälligkeiten aus den Fahrversuchen. Dadurch bieten die HIL-Prüfsysteme einen deutlichen technischen Mehrwert und werden somit effizient innerhalb des

Entwicklungs- und Freigabeprozesses eingesetzt.

Anforderungen an das Prüfsystem

Die grundsätzliche Anforderung an die Prüfumgebung besteht darin, alle vernetzten, kundenerlebbaren Steuergerätfunktionen am HIL-Prüfplatz abbilden zu können, d.h., das Steuergerät wird wie im Fahrzeug mit Daten von Sensoren und Aktoren versorgt

und soll sich dabei fehlerfrei verhalten. Der vernetzte HIL-Simulator für den Touareg Hybrid ist aufgrund des Umfangs von 29 Steuergeräten äußerst komplex. Um die Komplexität zu beherrschen, muss der Prüfstandslieferant umfassende Anforderungen bei Inbetriebnahme und anschließendem Testbetrieb erfüllen:

Modularität

Der Prüfplatz soll zunächst für drei Motorvarianten und das Automatikgetriebe des Volkswagen Touareg ausgelegt sein, zwischen denen schnell gewechselt werden kann: Diesel-Antrieb (3.0 l TDl), Otto-Antrieb (3.6 l FSI) und Hybrid-Antrieb (3.0 l KFSI).

Flexibilität

Volkswagen setzt die HIL-Erprobung zwei Jahre vor SOP (Start of Produc-

„Ohne die sehr gute Zusammenarbeit mit den Steuergeräteentwicklern wäre die Inbetriebnahme des Prüfstandes nicht möglich gewesen.“

René Schüler, Volkswagen AG

Tabelle 1: Testthemen für den HIL-Test.

Testthema	Beschreibung
Fahrbereitschaft Hybrid	Bedingungen, bei denen die Fahrbereitschaft erreicht werden muss, bzw. nicht erreicht werden darf.
Koordination der Betriebszustände	Bedingungen für die einzelnen Betriebszustände, wie Starten/ Stoppen des Verbrennungsmotors, E-Fahrbetrieb, Bremsbetrieb/ Rekuperation, Boost-Funktion, (generatorisches Laden), Übergangszustände.
Fahrerinformation und Bedienung Hybrid	Fahrerinformationen Hybrid über Kombiinstrument und Display, Energieflussanzeige, Bordcomputer, Rekuperationsanzeige, Warnsignale, Fehlermeldungen.
Fehlerreaktionen und Ersatzmaßnahmen	Test der Steuergeräte-Soll-Reaktionen auf eingespeiste Fehlerzustände.



Die NiMH-Batterie ist im Heck verbaut.

„Bei Fragen zu Funktionen und Entwicklungsständen der Steuergeräte reichte meist ein Anruf und der entsprechende Entwickler stand mit seinem Wissen zur Verfügung.“

Christian Claus, IAV GmbH

tion) zur Absicherung des ersten Prototyps ein. Die Steuergeräte befinden sich zu dem Zeitpunkt noch in der Entwicklung und erfahren permanente Systemänderungen, z. B. Sensoranpassungen oder Pinning-Änderungen (Belegung der Steckverbindungen). Diese Änderungen müssen mit dem HIL-Simulator schnell und elegant nachpflegbar sein – in der Regel noch mit unausgereifter Steuergerätediagnose.

Effiziente Softwarestrukturen und Systemstabilität

Der Verbundsimulator liefert bei Volkswagen einen wichtigen Beitrag für die Funktionserprobung und Freigabe von Softwareständen. Demnach muss ein System – besonders im Rahmen automatisierter Tests – stabil funktionieren. Erschwert wird diese Tatsache durch den regelmäßigen Umbau der Antriebsvarianten.

Bedienerfreundlichkeit

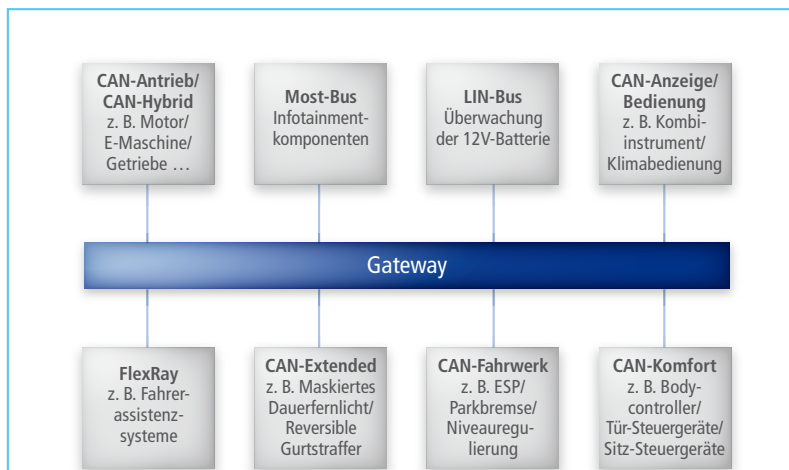
Nicht jeder Prüfstandsnutzer kann zum HIL-Profi ausgebildet werden. Die Testobjektverantwortlichen und die Fachabteilungen/Zulieferer nutzen den HIL-Simulator zur effizienten Durchführung ihrer Testaufgaben. Die Effizienz besteht darin, sich in die Steuergerätefunktionen und nicht in die technischen Details des Simulators einarbeiten zu müssen.

Aufbau des Verbundsimulators

Der Simulator des Touareg Hybrid ist als Virtual Vehicle ausgelegt und deckt alle Fahrzeugdomänen ab. Die weitere Betrachtung fokussiert die Domäne Antriebsstrang, die folgende Systeme umfasst:

- Verbrennungsmotor
- Elektromotor
- Getriebe
- Hochvoltbatterie

Abbildung 3: Die Vernetzungsarchitektur des Touareg Hybrid.



Die realitätsnahe Simulation dieser Systeme erfolgt mit Simulationsmodellen, verschiedenen Echtteilen wie Drosselklappe und Einspritzventilen sowie einer Hochspannungselektronik zur Emulation der Batteriespannung.

Das HIL-System ist für drei verschiedene Motorvarianten und ein Automatikgetriebe mit unterschiedlichen Übersetzungen und Wandlern konfigurierbar. Dabei werden die Motor- und Getriebevarianten durch steuergerätespezifische Mappingstecker erkannt. Anschließend werden die zugehörigen Modellparameter geladen. So werden erforderliche

„Gemeinsam mit dSPACE haben wir gelernt, welche Anforderungen und Herausforderungen durch die Absicherung von vernetzten Hybridfunktionen am HIL-Simulator entstehen. Dieses gewonnene Wissen wird in weitere zukünftige Projekte einfließen.“

René Schüler, Volkswagen AG

Modularität und Flexibilität erreicht. Die zu testenden Steuergeräte sind größtenteils in einem Bretttaufbau untergebracht, der im Volkswagen-Versuchsbau aufgebaut wurde (Abbildung 4).

Bussysteme

Die Domäne Antriebsstrang ist mit verschiedenen CAN- und LIN-Bussen sowie einem FlexRay-Bus ausgestattet (Abbildung 3). Für alle Busse wurden Restbussimulationen eingerichtet. Die CAN-Busse sind mit einem Manipulations-Gateway zur Main- und Local-Umschaltung ausgestattet. Damit ist es möglich, jedes einzelne Steuergerät vom Bus zu trennen und auf einem separaten Bus zu isolieren. Die empfangenen Nachrichten können auf dem jeweils anderen Bus gespiegelt wiedergegeben werden. Diese Umschaltung erlaubt eine gezielte Manipulation von CAN-Nachrichten auf Signalebene sowie deren Verzögerung oder die Simulation eines Steuergeräteaustauschs.

Simulationsmodelle

Die verwendeten Simulationsmodelle setzen sich aus VW-eigenen Modellen für die Verbrennungsmotoren und den Automotive Simulation Models (ASM) von dSPACE zusammen. Die Simulation des hybriden Antriebsstrangs und der Fahrdynamik erfolgt mit ASM DriveTrain, ASM Electric Components und ASM Vehicle Dynamics. Aufgrund der offenen Struktur der ASM ließen sie sich leicht mit den VW-Modellen zu einem Gesamtmodell für den hybriden Antriebsstrang verbinden. Ein im An-

triebsstrangmodell implementierter Spindelaktuator dient zur Abkoppelung des Verbrennungsmotors, um rein elektrisches Fahren zu simulieren. Für die Hochvoltbatterie kommt ein für Nickel-Metall-Hybrid (NiMH)-Charakteristik parametrisiertes Batteriemodell der ASM Electric Components zum Einsatz.

Die Modelle haben sich als sehr robust erwiesen und erlauben die Simulation aller konventionellen und hybriden Betriebsbedingungen, z. B. rein elektrisches Fahren, hybridisches Fahren, verbrennungsmotorisches Fahren, Rekuperation und Segeln. Die offenen Modelle erfüllen die geforderte effiziente Softwarestruktur.

Batteriesimulation und -emulation

Für den Test des Batteriemanagementsystems (BMS) müssen sowohl die Klemmenspannung der Hochvoltbatterie als auch die Spannungen von Batteriezellen-Clustern emuliert werden. Dafür stehen ein

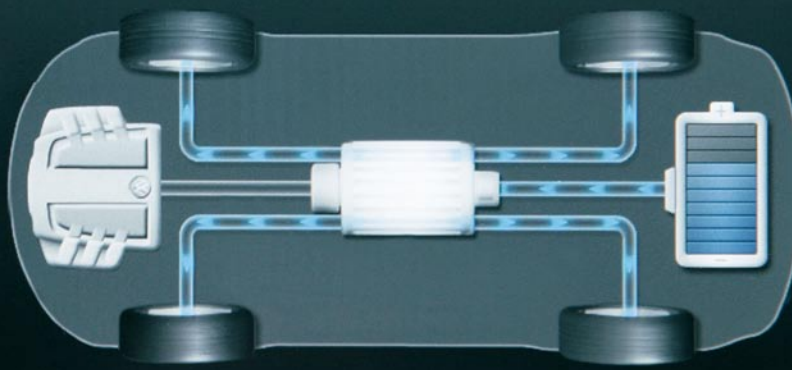
steuerbares 400-Volt-Netzteil und mehrere galvanisch isolierte DC-Trennverstärker zur Verfügung. Die Simulation des Zell- und Batterieerhaltens erfolgt mit dem Batteriemodell der ASM Electric Components, das sowohl das Netzteil als auch die Verstärker steuert. Mit diesem System lassen sich beispielsweise die Ein- und Ausschaltströme sowie das Lade- und Betriebsverhalten des NiMH-Energiespeichers zuverlässig abbilden. Um die hohen Spannungen zu isolieren und das Bedienpersonal zu schützen, ist die Hochvoltelektronik als abgeschlossenes System im Simulator verbaut.

Elektromotor-Simulation

Die Simulation der elektrischen Maschine, die im Touareg über eine Leistung von 38 kW verfügt, wird mit einem Dreiphasenstrom-Motormodell der ASM Electric Components durchgeführt. Für den Test des E-Motorsteuergeräts ist eine Auswertung auf Signalebene hinreichend.

Abbildung 4: Der Simulator samt Bretttaufbau im Labor.



 530 km


E-Motor

Hybrid

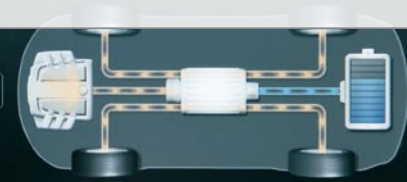
Assistenten

Einstellungen

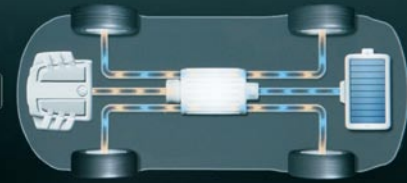
Offroad

530 km

Motor



Boost



Fahrerinformationsdisplay mit Energieflussdarstellungen für rein elektrisches Fahren, Laden, Boosten sowie Batterie-Regeneration und Verbrauch.

Dazu wurden die Schnittstellen zwischen Signal- und Leistungselektronik offengelegt. Die pulsweitenmodulierten Signale (PWM) zur Ansteuerung der Leistungshalbleiter (IGBT) werden mit einer PWM Measurement Solution vermessen und im Motormodell verarbeitet. Das Modell liefert Positions- und Stromsignale, die dem Steuergerät über Schnittstellenkarten (DS5202 PSS, DS2102) zur Verfügung gestellt werden. So lässt sich das Steuergerät im geschlossenen Regelkreis testen.

Betrieb und Erfahrungen

Die Inbetriebnahme des Simulators zeigte erneut, dass mit zunehmender

„Die Automotive Simulation Models (ASM) von dSPACE gewährleisten eine solide, zuverlässige Simulation der elektrischen Komponenten des Toureg Hybrid.“

René Schüler, Volkswagen AG

Komplexität der Fahrzeuge auch eine engere Zusammenarbeit zwischen Testern, Prüfstandsbetreibern und vor allem Entwicklern nötig ist. Ohne das Know-how der Steuergeräteentwickler aus den einzelnen Fachabteilungen und deren Bereitschaft, bei der Inbetriebnahme zu unterstützen, ist ein derartiges Pro-

jekt nicht realisierbar. Dies gilt auch für den nachfolgenden Betrieb, denn nur so können Änderungen der Steuergeräte-Software oder -Hardware und somit veränderte Anforderungen an den Prüfstand schnell und effizient umgesetzt werden. Neben den Entwicklern lieferte auch dSPACE mit einem Resident-Ingenieur einen wichtigen Beitrag zur laufenden Anpassung des HIL-Simulators an neue Gegebenheiten. So ist die Unterstützung durch HIL-Experten vor Ort stets sichergestellt, sowie die direkte Verbindung zur dSPACE-Entwicklungsabteilung gewährleistet.

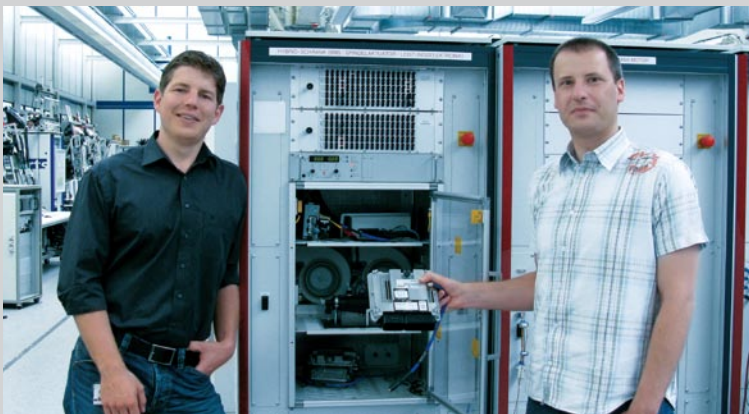
Aufgrund der hohen Dynamik und Modularität beim Umbau des Prüfplatzes konnten stets die zu den oben beschriebenen GIT-Phasen aktuellen Steuergeräteversionen betrieben werden. Neben der Erprobung der vernetzten Funktionen seitens ACC, SWA, ESP etc. lag der Testschwerpunkt im Bereich Hybridkoordination. Hierbei lag der Fokus vor allem auf der Überprüfung der

René Schüler, Volkswagen AG

René Schüler ist Projektleiter für die HIL-Simulation des Toureg Hybrid bei Volkswagen in Wolfsburg.

Christian Claus, IAV GmbH

Christian Claus ist Projekt-Ingenieur und hat den HIL-Test des Toureg Hybrid bei Volkswagen intensiv unterstützt.



Fahrerinformation und Bedienung der Hybridfunktionen sowie einer korrekten Reaktion im Fehlerfall und der plausiblen Auswahl der einzelnen Fahrzustände.

Ausblick

Es ist geplant, den HIL-Prüfstand für zukünftige Motorvarianten des Touareg zu erweitern. Dazu sind neue Verbrennungsmotormodelle zu integrieren und die Steuergeräteerkennung per Mappingstecker einzurichten. Darüber hinaus soll die HIL-Testumgebung um eine hoch-

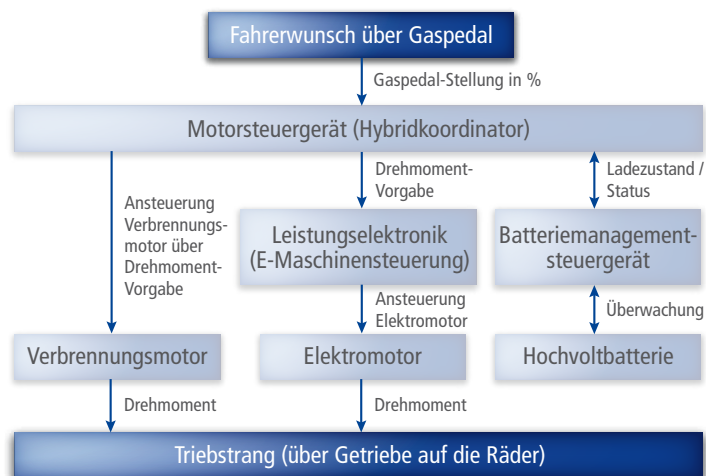
auflösende Umfeldsimulation zur Durchführung von virtuellen Probefahrten ausgebaut werden, um die Steuergeräte einiger Fahrerassistenzsysteme in die Simulation einzubeziehen. Dazu ist es erforderlich, die Sensoren (Kamera, Radar) dieser Systeme geeignet zu stimulieren. ■

*René Schüler,
Dr. Marcus Brand
Volkswagen AG
Christian Claus
IAV GmbH
Deutschland*

Beispiel für eine vernetzte Funktion aus dem Touareg Hybrid

Das Motorsteuergerät stellt neben der Steuerung des Verbrennungsmotors den Hybridkoordinator dar. Dessen Aufgabe ist sowohl die Momenten-Koordination im Triebstrang als auch die Überwachung der beteiligten Steuergeräte wie Batteriemanagement oder Leistungselektronik.

Wenn der Fahrer das Gaspedal betätigt und so dem Motorsteuergerät sein Fahrerwunschmoment zur Verfügung stellt, wird dort je nach angefordertem Drehmoment (Beschleunigungswunsch/Geschwindigkeitswunsch), Systemstatus, Temperaturen und dem Batterieladestatus (SOC) entschieden, ob eine elektrische Fahrt, eine verbrennungsmotorische Fahrt oder eine Kombination aus beidem, das sogenannte Boosten, realisiert werden soll.



Fazit

Mit Hilfe des dSPACE HIL-Simulators konnte ein wichtiger Beitrag zur Funktionsabsicherung während der Entwicklung des Volkswagen Touareg geleistet werden. Auch nach dem ersten Serienanlauf wird der Prüfplatz für weitere Anläufe und Modellpflegen genutzt. Aufgrund der sehr geringen Umrüstzeiten konnten innerhalb der GIT-Phasen mehrere Motorvarianten erprobt werden. Gemeinsam mit dSPACE haben wir gelernt, welche Anforderungen und Herausforderungen durch die Absicherung von vernetzten Hybridfunktionen am HIL-Simulator entstehen. Dieses gewonnene Wissen wird in weitere zukünftige Projekte einfließen. Im Volkswagen Konzern ist eine enge, markenübergreifende Zusammenarbeit bei der Funktionserprobung an vernetzten HIL-Prüfständen gelebte Praxis. Sowohl der Nachfolger des Volkswagen Touareg, der des Audi A8 als auch der des Porsche Cayenne basieren auf der Technik des modularen Längsbaukastens (MLB). Daraus abgeleitet entstand das Ziel, für die standardisierte Fahrzeugtechnik auch eine standardisierte HIL-Prüfstandstechnik mit nach Möglichkeit einheitlicher Hardware- und Software-Struktur einzusetzen. Auf dSPACE wurde u.a. aufgrund der umfangreichen Erfahrung bei der Marke Audi (Lead-Entwickler für den modularen Längsbaukasten) in der MLB-Erprobung gesetzt. Audi, Volkswagen und Porsche arbeiteten eng bei der Planung, Umsetzung und Inbetriebnahme der Prüfplätze zusammen und nutzten dabei sämtliche Synergien der eng verwandten Fahrzeugprojekte. Darüber hinaus entstand neben der HIL-Technik auch eine erfolgreiche Zusammenarbeit bei der Testfallerstellung, Testfallautomatisierung (Konzerntool EXAM) und Fehlerverfolgung.