

# ATZ extra



ENTWICKLUNG | TESTMETHODEN

## X-IN-THE-LOOP

zur durchgängigen Erprobung einsetzen

 Springer Vieweg





## X-in-the-Loop – Eine durchgängige Erprobungsmethodik

Die steigende Komplexität aufgrund der Digitalisierung und Elektrifizierung und kürzere Entwicklungszeiten für die Erprobung von Fahrzeugantrieben stellen Herausforderungen dar, die es zu überwinden gilt. Bei Mercedes-Benz wurde ein Konzept für eine durchgängige Erprobungsmethodik mit generischen Tests entwickelt, die Synergien unterschiedlicher Testplattformen nutzt und somit einen wesentlichen Beitrag für eine effiziente Produktentwicklung leistet.

Bei der Fahrzeugerprobung werden zahlreiche Tools zur Testautomatisierung, Diagnose und Fehleranalyse verwendet. Da sie sich unterscheiden, können vorhandene Testfälle einer bestimmten Erprobungsumgebung nicht ohne weiteres auf einer anderen Plattform wiederverwendet werden. Bei der Entwicklung einer durchgängigen Methodik wurden für folgende Erprobungsumgebungen generische Testfälle definiert:



© Mercedes-Benz



- Software-in-the-Loop (SiL)
- Hardware-in-the-Loop (HiL)
- Prüfstände (beispielsweise Komponenten-, System- oder Fahrzeugprüfstände)
- Fahrzeug auf der Straße.

Die Methodik erlaubt, Tests zwischen den Erprobungsumgebungen ohne manuelle Anpassung des Testskripts auszutauschen. Der Aufwand zur Erstellung von Testfallbeschreibungen wird reduziert und die Durchgängigkeit über alle Erprobungsumgebungen ermöglicht. Doppelarbeit wird verhindert, eine einfache Ergebnisvergleichbarkeit identischer Testfälle über verschiedene Testplattformen ist möglich.

## AUTOREN



**Dr.-Ing. Carsten Karthaus**  
ist Versuchs-/Entwicklungsingenieur für Methodikentwicklung im Antriebsintegrationszentrum (AIZ) bei der Mercedes-Benz AG in Sindelfingen.



**Alexander Bick, M. Sc.**  
ist Entwicklungsingenieur im Bereich Powertrain Hardware-in-the-Loop bei der Mercedes-Benz AG in Untertürkheim.



**Brian Douglas, B. Sc. (Hons)**  
ist Entwicklungsingenieur für eDrive Systemintegration bei der Mercedes-Benz AG in Untertürkheim.



**Dipl.-Ing. Falko Hanke**  
ist Projektkoordinator für Vergabemanagement eDrive bei der Mercedes-Benz AG in Sindelfingen.

## DEFINITION XiL UND SYSTEMTESTS

Der X-in-the-Loop-Ansatz (XiL) basiert auf der Systemtechniktheorie von Ziel-, Handlungs- und Objektsystem (ZHO-Modell). Er verfolgt die Idee, dass die Validierung auf den unterschiedlichen Produktdetaillierungsebenen entlang des Entwicklungsprozesses unter ständiger Einbeziehung des Systems „Benutzer“ (Fahrer oder Fahrerin) und des Systems „Umwelt“ passieren soll [1] und erstreckt sich über Komponenten und Subsysteme bis hin zum Gesamtsystem. Die Validierung stellt im ZHO-Modell die zentrale

Aktivität der Produktentwicklung dar, die neues Wissen generiert [2, 3]. Für unterschiedliche Systemdetaillierungsebenen sind spezialisierte Erprobungsumgebungen vorgesehen. Für die Ebene „Fahrzeug“ werden realer Straßenverkehr, Testgelände und Fahrzeugprüfstände genutzt (Vehicle-in-the-Loop, ViL). Für die Ebene „System“ stehen Antriebsstrangprüfstände, für die Ebene „Steuergerät“ HiL-Prüfstände und für die Ebene „Software“ SiL-Simulationen zur Verfügung. Der XiL-Ansatz verbindet diese Erprobungsumgebungen mit einer übergreifenden Methodik, wobei das „X“ jeweils für die Abstraktionsebene des zu untersuchenden Prüflings steht [1]. Je nach Erprobungsumgebung ändern sich die Systeme Fahrer beziehungsweise Fahrerin, Umwelt und Prüfling. Bei jeder wird eine Testablaufbeschreibung benötigt, **BILD 1**, die idealerweise unabhängig von der Umsetzung und der Automatisierungstechnik der Umgebung einsetzbar sein soll.

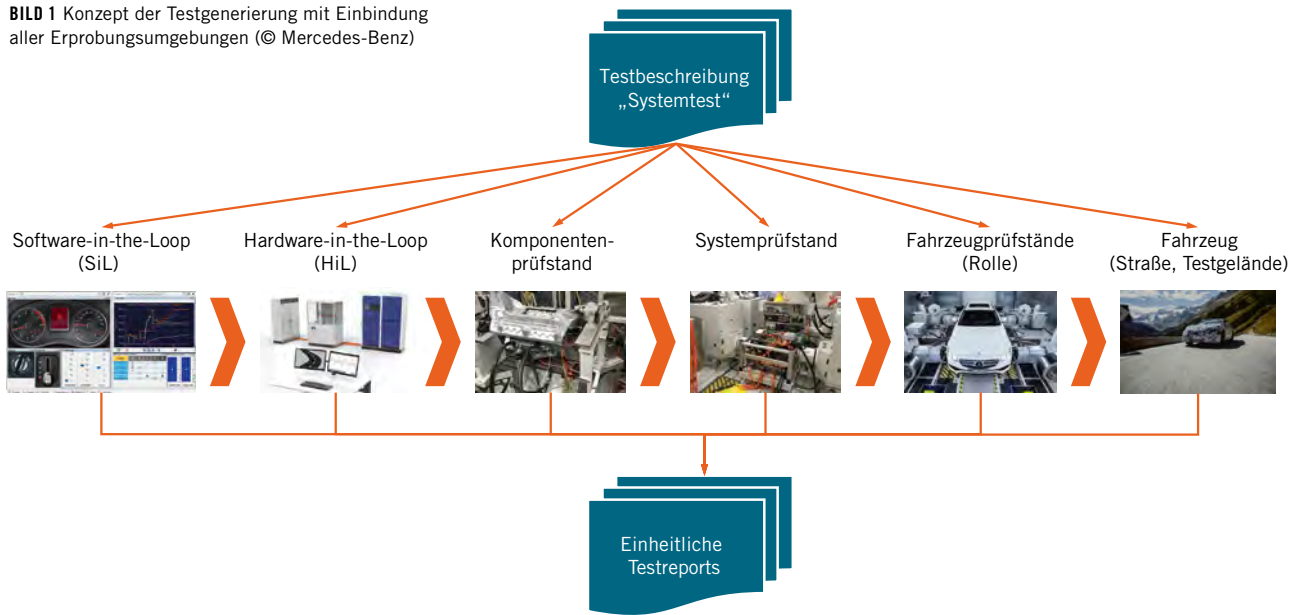
Die Methodik bietet insbesondere einen Mehrwert für Systemtests – Tests aus Sicht des Fahrers oder der Fahrerin, die die definierten Produktanforderungen des Systems validieren sollen: Fehler entdecken, Vertrauen in das System aufbauen, den Nachweis der Funktionsfähigkeit des Systems führen und eine vorgegebene Testüberdeckung erreichen [4]. Der Detaillierungsgrad des Prüflings steigt sich in der Regel von der SiL-Simulation bis zum Gesamtsystem Fahrzeug auf der Straße. Daher sind Modul-, Komponenten- und Integrationstests meist prädestiniert für eine Testplattform und aufgrund besonderer Randbedingungen selten übertragbar. Systemtests hingegen sind in allen Testplattformen übergreifend durchführbar, wenn ein „fahrbares“ Gesamtsystem vorhanden ist. Dies gilt auch, wenn nur bestimmte Komponenten real vorhanden sind und die übrigen simuliert werden. Für ursprünglich andere Testarten prädestinierte Plattformen sind so vielseitiger einsetzbar.

## KONZEPT

Die Durchgängigkeit der Testbeschreibung für alle Plattformen wird erreicht, indem die Abhängigkeiten zwischen den Systemen Fahrer beziehungsweise Fahrerin und Prüfling – dem Human-Machine-Interface (HMI) – generisch dargestellt werden. Die Aktionen des

# ENTWICKLUNG TESTMETHODEN

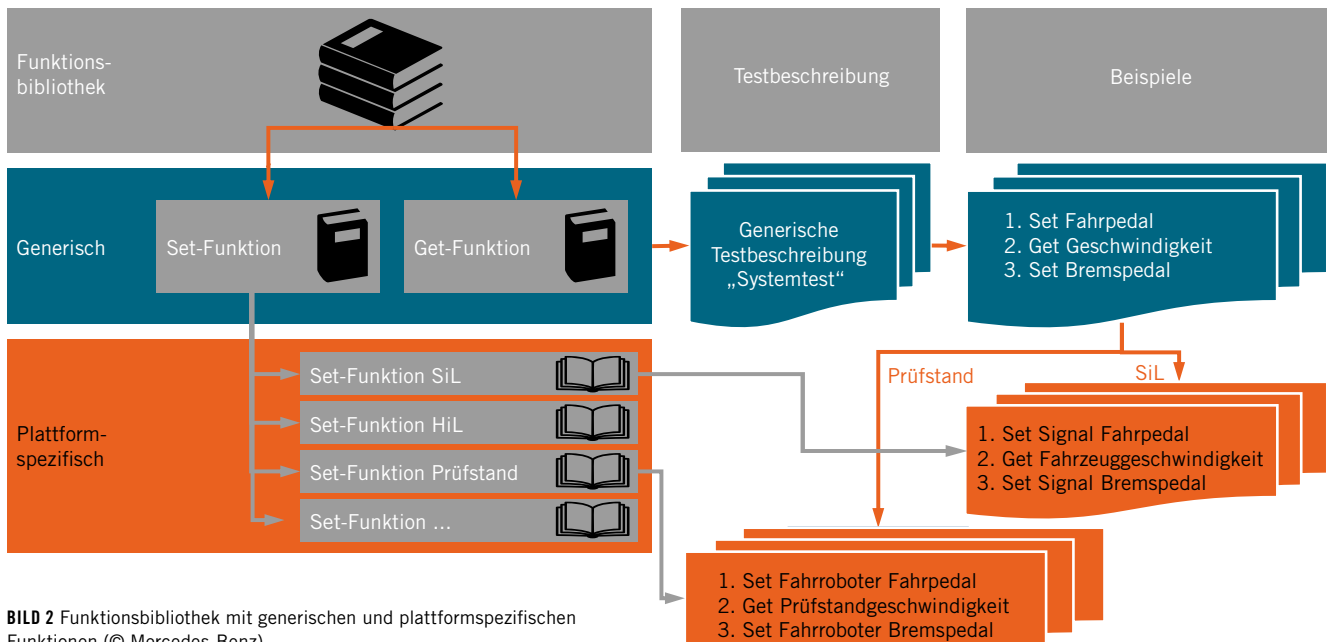
**BILD 1** Konzept der Testgenerierung mit Einbindung aller Erprobungsumgebungen (© Mercedes-Benz)



Fahrers oder der Fahrerin und die Rückmeldungen an ihn werden als kleinste generische Funktionen und gemeinsame Schnittmenge der verschiedenen Testplattformen definiert. Dazu gehören unter anderem Ansteuerungen, bei denen der Fahrer oder die Fahrerin etwas bedient, oder Rückmeldungen, bei denen der Fahrer beziehungsweise die Fahrerin einen Wert oder einen Zustand überprüft. Die Funktionen der Ansteuerung (Set-Funktionen) stellen eine aktive Beeinflussung des Prüflings, das Festlegen eines Werts (Schreibzugriff), das Ändern des Fahrzeugzustands oder das

Aufschalten eines Fehlers dar. Die Rückmeldungen (Get-Funktionen) sind zum Beispiel Werte, die von einem Steuergerät beziehungsweise Bussystem gelesen werden (Lesezugriff) oder den Tester auffordern, eine bestimmte Fahrzeugaktion oder einen -zustand (wie: Lade-stecker gesteckt) auszuwerten. Die generischen Set- und Get-Funktionen werden in einer Funktionsbibliothek zusammengefasst, **BILD 2**. Generisch bedeutet hier, die Funktionen sind unabhängig vom Fahrzeug und von der Testumgebung und beschreiben nur die Sicht des Fahrers oder der Fahrerin. Zur Durchfüh-

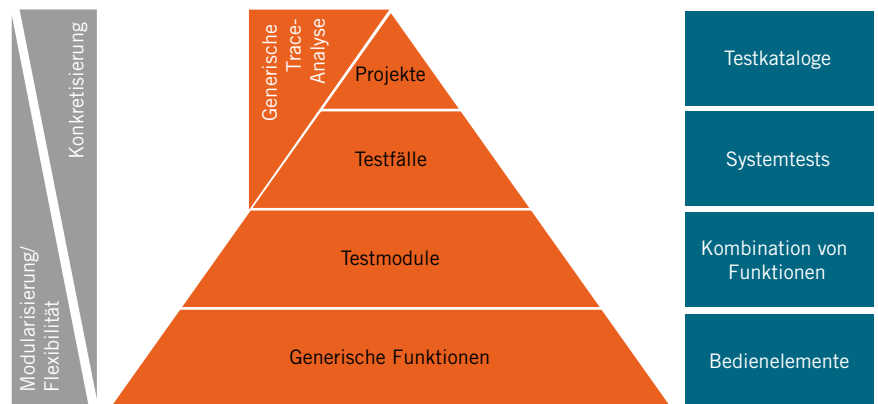
rung der Systemtest müssen die generischen Funktionen plattformspezifisch ausgeführt werden. Folglich muss in den generischen Funktionen definiert sein, wie die für jede Erprobungsumgebung spezifischen Ansteuerungen ausgelöst werden. Welche plattformspezifische Funktion verwendet wird, unterscheidet sich automatisch, je nachdem, in welcher Erprobungsumgebung der Test durchgeführt wird. Ein Beispiel für eine plattformspezifische Ansteuerung kann die Betätigung des Fahrpedals sein. Im Fahrzeug erfolgt diese Betätigung durch eine Anweisung an den Fahrer bezie-



**BILD 2** Funktionsbibliothek mit generischen und plattform-spezifischen Funktionen (© Mercedes-Benz)

hungsweise die Fahrerin, am Prüfstand durch die Ansteuerung eines Fahrroboters und in einer SiL-/HiL-Umgebung über die Vorgabe eines Simulationssignals. Die plattformspezifische Umsetzung einer einzelnen Funktion ist unabhängig von anderen Plattformen und losgelöst von der generischen Ebene. Dies ermöglicht eine zentrale Verwaltung der generischen Funktionen und eine dezentrale Verwaltung der plattform-spezifischen Funktionen.

Die Set- und Get-Funktionen stellen die nicht mehr weiter zerlegbaren Bestandteile eines generischen Testfalls dar, ähnlich wie Maschinenelemente in der Konstruktionstechnik. Sie erfüllen bei verschiedenen Testfällen jeweils gleiche oder ähnliche Funktionen in gleicher oder ähnlicher Form. Die Funktionen sind parametrierbar, damit sie ähnliche Aktionen auslösen können. Auf sie basierend lässt sich die unterste Ebene eines Testkonzepts definieren, **BILD 3**. Ein Testmodul stellt eine Kombination mehrerer Funktionen dar. Aus Funktionen und Modulen wird ein Testfall definiert, der zu übergreifenden Testkatalogen/-projekten zusammengeführt werden kann. Testkataloge können beliebige Validierungsbereiche abdecken. Die unterste Ebene eines Testfalls ist aus generischen Funktionen zusammengesetzt, somit ist auch der gesamte Testfall generisch. So entsteht ein modulares Konzept, das auf beliebige Erprobungsumgebungen erweiterbar ist. Damit wird erreicht, dass eine Testdefinition nur einmal erfolgt und in allen Testplattformen fahrzeugunabhängig genutzt werden kann.



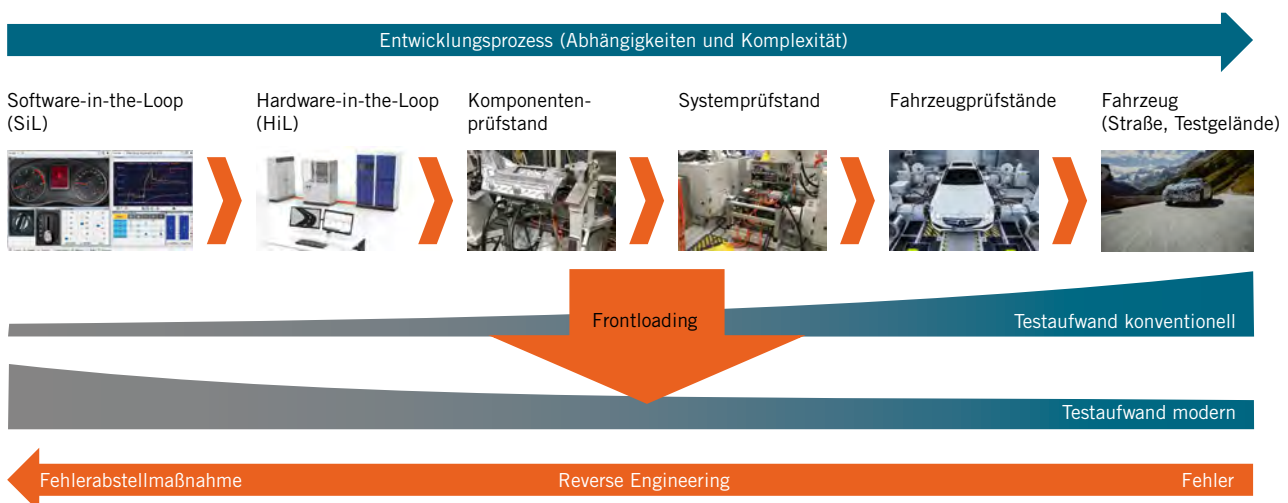
**BILD 3** Bausteine und Hierarchien für Systemtests (© Mercedes-Benz)

Das Konzept aus **BILD 3** ermöglicht außerdem die modularisierte, generische Trace-Analyse zur Überprüfung der spezifizierten Anforderungen. Hierunter wird eine automatisierte Messdatenauswertung verstanden, die auf Basis der aufgezeichneten Signale Auskunft über das Systemverhalten und die Erfüllung von Anforderungen gibt. Die Auswertungen können unabhängig von der Testplattform erstellt werden. Die Kombination von Testfällen und Trace-Analyse erfolgt in Projekten und ist modular. Beispielsweise kann eine Auswertung der Spitzenleistung der E-Maschine einmalig entwickelt und zu jedem Testfall modular hinzugefügt werden. So wird ein standardisiertes Reporting ermöglicht. Das Konzept wurde in wissenschaftlichen Arbeiten [5, 6, 7] und unter Anwendung des Testautomatisierungstools ECU-Test der Firma Tracetronic entwickelt. Dieses Tool basiert auf dem Asam-XIL-API-Standard und ermöglicht die Kopplung mit unterschiedlichen Testplattformen.

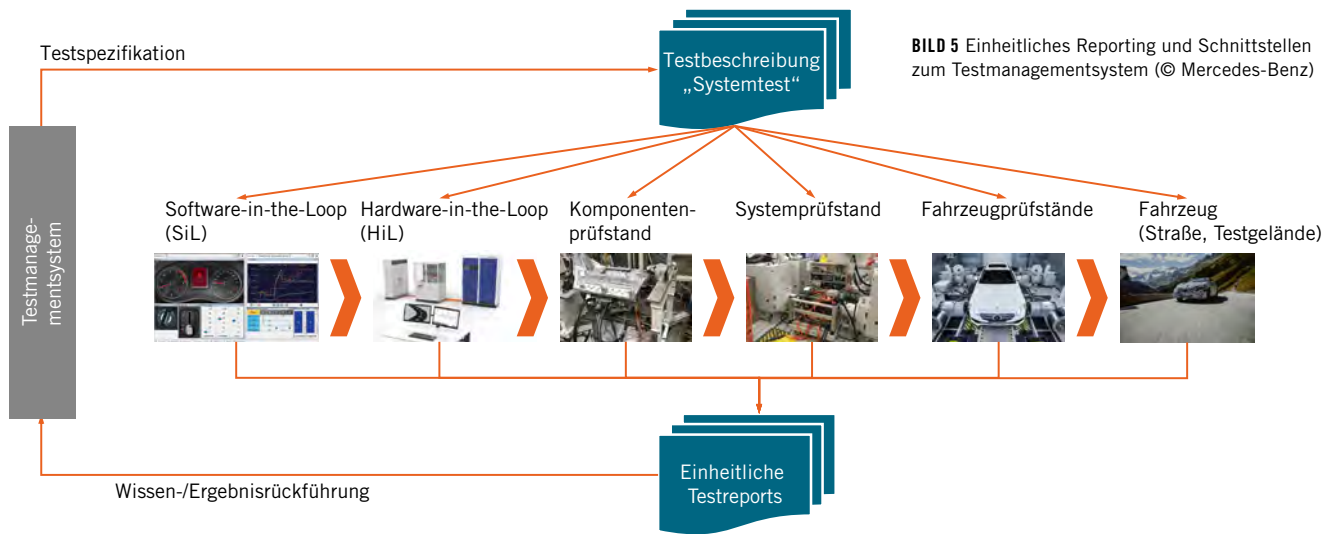
### AUSWIRKUNGEN AUF DIE PRODUKTENTWICKLUNG

Die Durchgängigkeit ermöglicht beispielsweise Tests mit einer virtuellen SiL-Simulation zu generieren und sie anschließend an einem Prüfstand auf das Gesamtsystem anzuwenden. Die Tests werden also im Laufe des Entwicklungsprozesses mitentwickelt. Somit ergibt sich ein Frontloading, **BILD 4** – der zeitliche Testaufwand wird vom Ende des Entwicklungsprozesses, von kostenintensiven Testumgebungen, hin zum Anfang in kostengünstigere Testumgebungen verlagert. Neue Tests sind so während der Entwicklung des Fahrzeugs auf allen Prüfumgebungen nutzbar und Änderungen an Testfällen fließen sofort überall ein.

Auch im Reverse Engineering, **BILD 4**, findet das Konzept Anwendung. Wird beispielsweise im Fahrzeug ein Software-Fehler entdeckt, kann ein Testfall, der dieses Fehlverhalten reproduziert,



**BILD 4** Frontloading und Reverse Engineering im Produktentwicklungs- und Erprobungsprozess (© Mercedes-Benz)



**BILD 5** Einheitliches Reporting und Schnittstellen zum Testmanagementsystem (© Mercedes-Benz)

entwickelt und in einer geeigneten Plattform (beispielsweise SiL-/HiL-Umgebung) automatisiert getestet und detaillierter analysiert werden. Daraus definierte Fehlerabstellmaßnahmen können dank der Übertragbarkeit der Testfälle auf ihre Wirkung geprüft und anschließend deren Wirksamkeit reproduzierbar und vergleichbar am Prüfstand nachgewiesen werden. Die Vergleichbarkeit der Testabläufe ist Grundlage für eine Ergebnisvergleichbarkeit und somit auch für eine Validierung der Streckenmodelle unterschiedlicher Testplattformen.

Die Methodik ermöglicht eine optimierte Vernetzung mit dem Testmanagement durch zwei Schnittstellen: eine einheitliche Testspezifikation und eine Wissens-/Ergebnisrückführung mittels standardisiertem Reporting, **BILD 5**. Die Testspezifikation definiert hierbei, welches Wissen für die Erprobung notwendig ist und die Wissens-/Ergebnisrückführung dokumentiert, welches Wissen aus der Erprobung gewonnen wird [3].

**ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK**

Das vorgestellte Konzept wurde evaluiert mit unterschiedlichen Tests in allen beteiligten Plattformen mit identischen Prüfingen. Die Ergebnisse belegen,

dass der Einsatz von zentral verwalteten generischen Systemtests auf verschiedenen Testplattformen funktioniert und vergleichbare Testabläufe geliefert werden. Hierdurch wird eine Durchgängigkeit in der Fahrzeugerprobung ermöglicht, wodurch sich folgende Vorteile ergeben: Testwiederverwendung, Testvergleichbarkeit, erleichterte Zusammenarbeit von Produktentwicklung/Erprobung, Frontloading bei der Testfallerstellung, Reverse Engineering zur Unterstützung der Fehleranalyse, Validierung der Streckenmodellierung und Optimierung des Testmanagements.

Zukünftige Untersuchungen legen den Fokus vor allem auf den weiteren Ausbau digitaler Erprobungsumgebungen, um frühzeitig unter möglichst realistischen Randbedingungen testen zu können. Um den Realversuch zu entlasten, muss bewertet werden, welche Anwendungsfälle in welcher Testplattform zweckmäßig durchführbar sind. Bereits heute ermöglicht dieses Testkonzept eine wesentlich effizientere Validierung von Fahrzeugen bei kürzeren Entwicklungszyklen und leistet einen wertvollen Beitrag zur Produktentwicklung.

**LITERATURHINWEISE**

[1] Düser, T.: X-in-the-Loop – ein durchgängiges Validierungsframework für die Fahrzeugentwicklung

lung am Beispiel von Antriebsstrangfunktionen und Fahrerassistenzsystemen. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Dissertation, 2010  
 [2] Albers, A.; Behrendt, M.; Klingler, S.; Matros, K.: Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess. In: Lindemann, U. (Hrsg.): Handbuch Produktentwicklung. München: Carl Hanser Verlag, 2016, S. 541–569  
 [3] Karthaus, C.: Methode zur Rückführung von Erprobungswissen in die Produktentwicklung am Beispiel Fahrzeugtriebstrang. Stuttgart, Universität, Dissertation, 2020  
 [4] Sattler, K.: Methodik für den Systemtest in der integralen Fahrzeugsicherheit. Magdeburg, Otto-von-Guericke-Universität, Dissertation, 2015  
 [5] Bittner, A.: Durchgängigkeit der Sollwertvorgabesysteme zur Funktionserprobung von modernen Antriebssträngen. Berlin, Hochschule für Technik und Wirtschaft, Masterarbeit, 2017  
 [6] Lee, C.H.: Development and Evaluation of Generic Test Scripts for Powertrain Control Unit Function Code in Multiple Test Platforms. Esslingen, Hochschule, Masterarbeit, 2020  
 [7] Ziehe, R.: Konzepterstellung einer digitalen Erprobungsumgebung für batterieelektrische Fahrzeuge mittels X-in-the-Loop Ansatz. Ilmenau, Technische Universität, Bachelorarbeit, 2021

**DANKE**

Die Autoren bedanken sich bei den Mitarbeitern der Mercedes-Benz AG Harald Behrendt, Dr.-Ing. Josef Steuer, Marc Reichenbacher, Marc Rosenbeck, Choon Ho Lee und Richard Ziehe. Ein besonderer Dank geht an Steve Adam von der Firma Tracetronic.

**IMPRESSUM:**

Sonderausgabe 2021 in Kooperation mit tracetronic GmbH, Stuttgarter Str. 3, 01189 Dresden; Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Postfach 1546, 65173 Wiesbaden, Amtsgericht Wiesbaden, HRB 9754, USt-IdNr. DE811484199

**GESCHÄFTSFÜHRER:**

Stefanie Burgmaier | Andreas Funk | Joachim Krieger

**PROJEKTMANAGEMENT:** Anja Trabus

**TITELBILD:** © Chesky\_W | istockphoto.com



click here

