



LÜCKE IM V-MODELL VON E-ANTRIEBEN DURCH PARAMETER-IDENTIFIKATION GESCHLOSSEN

Die Designphase von neuen automobilen Komponenten im Entwicklungszyklus basiert im Wesentlichen auf Simulationsmodellen. Für den konventionellen Antrieb liegen bereits viele unterschiedliche Modelle und deren Parametrisierung vor. Für den elektrifizierten Antriebsstrang liegen die Erfahrungen in dieser Tiefe allerdings noch nicht vor – gerade beim Design von leistungselektronischen Systemen entstehen neue Modelle, die zusätzliche thermische Effekte berücksichtigen. Das haben Scienlab und Bosch identifiziert und Lösungen entwickelt.

Sonderdruck

aus ATZelektronik 05.2013 | Springer Vieweg | Springer Vieweg Fachmedien Wiesbaden GmbH

AUTOREN



**DIPL.-ING. (FH)
ALEXANDER MOISZI**

ist Projektleiter für Prüftechnik, Weiterentwicklung und Technikbereitstellung bei der Robert Bosch GmbH in Tamm.



DR.-ING. MICHAEL SCHUGT

ist Geschäftsführer und verantwortlich für den Bereich Technology bei der Scienlab electronic systems GmbH in Bochum.



MICHAEL TYBEL, M. SC.

ist Projektleiter im Bereich Test bei der Scienlab electronic systems GmbH in Bochum.

ENTWICKLUNGSPROZESS

Zur Entwicklung von E/E-Systemen nach dem V-Modell werden während der Designphase verschiedene Simulationsmodelle herangezogen. Insbesondere bei neuartigen leistungselektronischen Komponenten ist nach der Realisierungsphase aufgrund des fehlenden langjährigen Expertenwissens die Frage nach der Qualität des Simulationsmodells und den Parametern zu stellen.

Heutzutage ist es eine weit verbreitete Methode, den Komponententest mit Power-HiLs (Hardware-in-the-Loop) durchzuführen. Hierbei werden mit Emulatoren die AC- und DC-seitigen Randbedingungen der Komponenten entsprechend der Applikation im hohen Strom- und Spannungsbereich reproduzierbar nachgebildet. Aufgrund der hohen Güte der Emulatoren können einzelne Parameter der Komponenten ohne eine Beeinflussung von anderen Komponenten messtechnisch exakt identifiziert werden. Die so gewonnenen optimierten Simula-

tionsparameter finden direkte Anwendung im nächsten Entwicklungszyklus.

Die Designphase von neuen automobilen Komponenten im Entwicklungszyklus basiert im Wesentlichen auf Simulationsmodellen. Für den konventionellen Antrieb liegen bereits viele unterschiedliche Modelle und deren Parametrisierung in hoher Qualität vor.

Für den elektrifizierten Antriebsstrang liegen die Erfahrungen in dieser Tiefe allerdings noch nicht vor. Gerade beim Design von leistungselektronischen Systemen entstehen neue Modelle, die zusätzliche elektrothermische Effekte berücksichtigen. Die Parameter für diese Modelle basieren häufig auf FEM-Simulationen (Finite-Elemente-Methode), die wiederum auf Materialparametern basieren. Die Überprüfung der Modellparameter findet in der Verifikationsphase des Produkts statt. Mit bestimmten Messmethoden werden gezielt ausgewählte Parameter messtechnisch identifiziert. Voraussetzung hierfür ist, dass die entwickelte Komponente ohne Wechselwirkung mit anderen Systemen vermessen werden kann.

POWER-HIL SCHLIESST DIE LÜCKE

Eine Lösung, solche Messungen der Komponenten im elektrischen oder elektrifizierten Antriebsstrang durchzuführen, stellen die sogenannten Power-HiLs dar. Sie ermöglichen den unabhängigen Test nicht nur auf der Signalebene eines Steuergeräts, sondern auch auf der elektrischen Leistungsebene. Neben der funktionalen Erprobung können damit

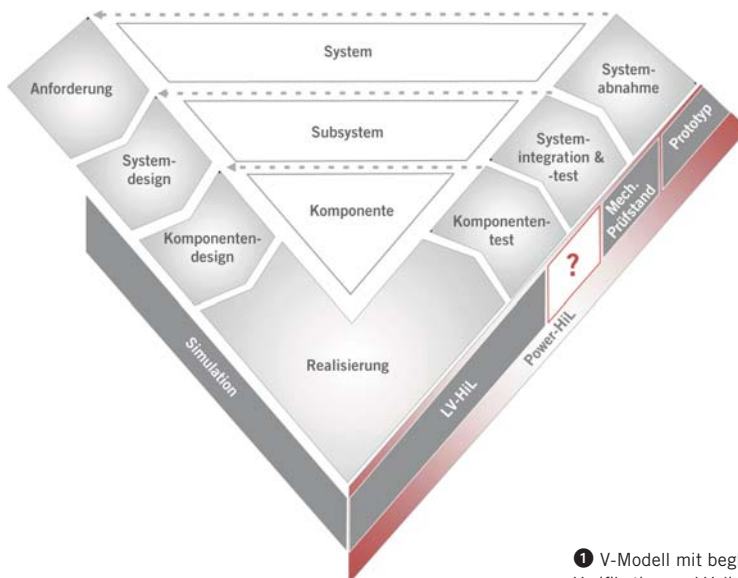
unter anderem die Auswirkungen auf das thermomechanische Verhalten untersucht werden. Das V-Modell, ❶, umfasst im Wesentlichen die Definitions-, die Realisierungs- und schließlich die Validierungsphase.

Bei der Entwicklung von Steuergeräten werden während der Definitionsphase häufig Modelle entwickelt und offline simuliert. In der Realisierungsphase werden hingegen Rapid-Control-Prototyping (RCP)-Entwurfsmethoden eingesetzt, deren Lösungen innerhalb eines HiL-Systems erprobt werden.

Anschließend findet im rechten Flügel des V-Modells die Verifikation und Validation der Subsysteme sowie des Gesamtsystems statt. Das Testspektrum reicht in dieser Phase von der Überprüfung eines speziellen Code-Zweigs, über Tests einzelner elektronischer Komponenten (Sensoren, IGBT-Treiber) bis zum applikationsgleichen Zyklusfahren.

Vor einem Integrationstest erfolgt der Test der Einzelkomponente, um die parallel entwickelten Subsysteme zu einem gemeinsamen Reifegrad zu führen – und dies möglichst unabhängig voneinander. Das garantiert eine hohe Produktqualität, reduziert die Produkteinführungszeit und somit die Entwicklungskosten. Um den Testaufwand zu reduzieren, müssen Prüfungen zu einem frühestmöglichen Zeitpunkt stattfinden, und zwar mit dem jeweils erforderlichen Detaillierungsgrad.

Die Simulation ist während der Definitions- und zu Beginn der Realisierungsphase sehr gut geeignet, aber nicht



❶ V-Modell mit begleitender Verifikation und Validation

zum Testen von Hardware. Den Bereich zwischen der Offline-Simulation und der Verifikation auf der elektrischen Ebene schließt zunächst der LV-HiL.

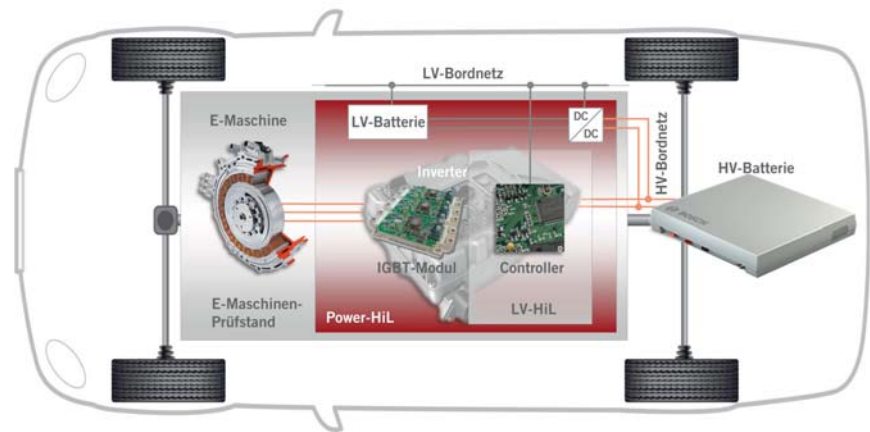
Dem gegenüber steht der Prototypenaufbau, bei dem die aus der Entwicklung kommenden Systeme im Verbund und unter realer Beanspruchung abgesichert werden. Ein derart geschlossener Aufbau ist allerdings erst dann ausreichend aussagekräftig, wenn alle betroffenen Komponenten mit dem entsprechenden Reifegrad verfügbar sind. Bei komplexeren Systemen kommt somit ein entwicklungsbegleitender Verbundtest nicht in Frage.

Für die Entwicklung von elektrischen Komponenten schließt hier der Power-HiL die Lücke zwischen LV- und dem Verbund-Test. Er erlaubt neben der Nachbildung der Steuerschnittstellen auch die Emulation von applikationsgenauen hohen Spannungen, Strömen und Leistungen. Fehlende Realkomponenten werden hierbei durch HV-Emulatoren ersetzt. Diese erzeugen Spannungen und Ströme gemäß Modell, der spezifischen Hardware des Systems und den tatsächlichen Arbeitspunkten.

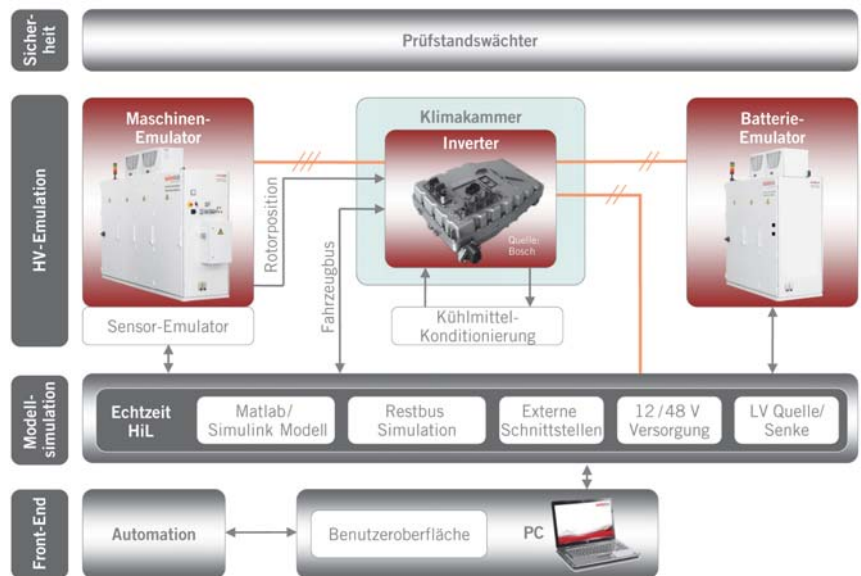
② veranschaulicht für die verschiedenen Entwicklungsphasen verschiedene geeignete Prüfansätze. Für den Test leistungselektronischer Fahrzeugkomponenten haben sich die Power-HiL-Testumgebungen von Scienlab erfolgreich etabliert. Typische Anwendungsfelder sind in der Entwicklung von Energiespeichern, Wechselrichtern, der Ladetechnologie sowie des Bordnetzes und des Antriebsstrangs zu finden.

APPLIKATION: ENTWICKLUNG VON TRAKTIONSWECHSELRICHTERN

Zur Veranschaulichung wird im Folgenden die Entwicklung eines Inverters betrachtet. Hierbei unterscheiden sich die Anforderungen an automobile Traktionswechselrichter deutlich von industriellen Umrichtern. Da sich Störungen im Antriebsstrang unweigerlich auf die Gesamtfahrzeugdynamik auswirken, steht die funktionale Sicherheit gemäß ISO 26262 im Vordergrund. Testfälle und funktionale Sicherheitsbeschränkungen variieren je nach Ausführung des Antriebsstrangs. Neben PMSM- und ASM-Maschinen findet man fremderregte Synchronmaschinen sowie geschaltete Reluktanzmaschinen. Dementsprechend wird für den Komponententest eine Testumgebung benötigt, die durch eine freie Parametrisierung der



② EV-Komponenten und geeignete Prüfansätze



③ Power-HiL-Architektur am Beispiel des Traktionswechselrichters

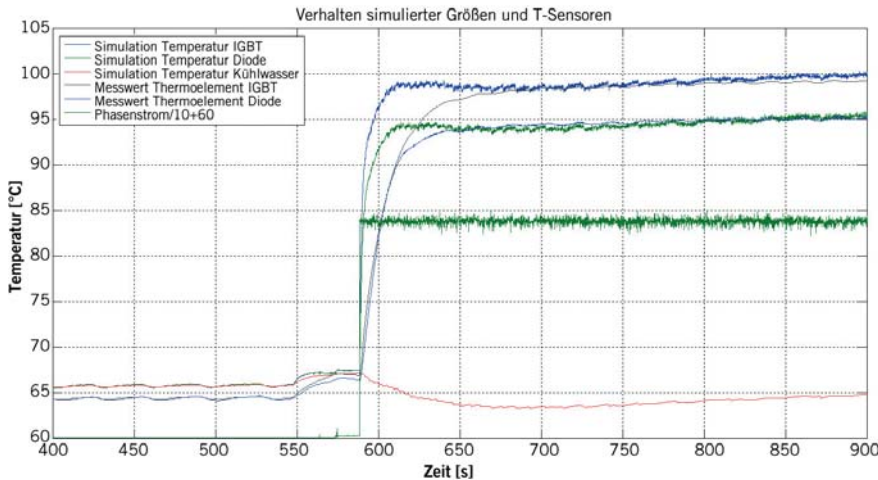
elektrischen Nachbildung der DC-seitigen HV-Batterie sowie der AC-seitigen E-Maschine eine maximale Applikationsvielfalt erlaubt. Durch den Einsatz eines Batterie- und Maschinen-Emulators ergeben sich dann wesentliche Vorteile: Die leistungselektronischen Komponenten des Wechselrichters können gemäß ISO 26262 bereits mit HiL-Methoden durch Plausibilisierung der Arbeitspunkte mit korrespondierenden Spannungen, Strömen und den mechanischen Momenten und Maschinenparametern verifiziert werden. ③ zeigt die Power-HiL-Architektur, vertikal in vier Bereiche unterteilt: Benutzerschnittstelle (Front-End), Modellsimulation, HV-Emulation und Sicherheit.

SAFE OPERATION AREA – PARAMETERIDENTIFIKATION

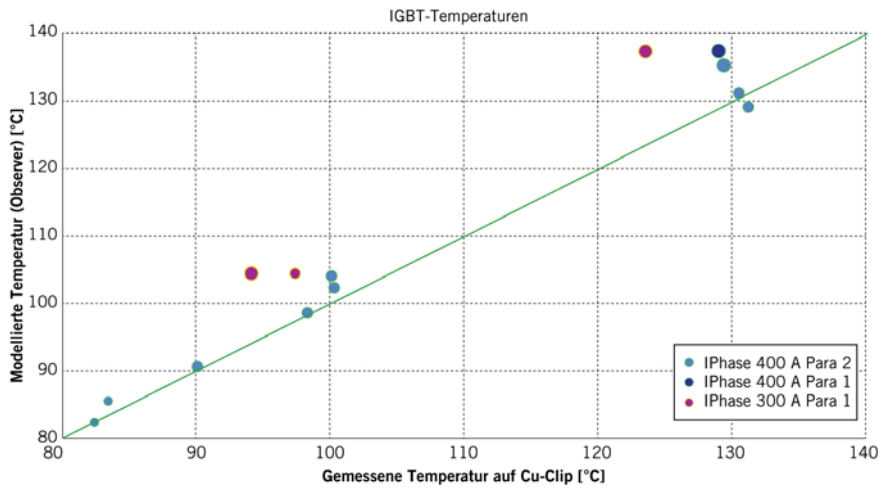
Der Power-HiL dient zur Verifikation bestimmter Funktionen einer Kompo-

nente. Darüber hinaus können aber auch die in der Designphase verwendeten Modelle und deren Parameter messtechnisch identifiziert werden. Ein wesentlicher Vorteil des Scienlab-Power-HiLs ist die vielfach unter Beweis gestellte Emulationsgenauigkeit, die zu einer hohen Reproduzierbarkeit von Testergebnissen und deren Vergleichbarkeit führt. Darüber hinaus bietet es den Vorteil, eine Komponente unabhängig von anderen zu testen. Dadurch können Arbeitspunkte vermessen werden, die in der realen Applikation durch die umgebenden Komponenten limitiert werden.

Ein anschauliches Beispiel hierfür ist die Vermessung des thermischen SOA (Safe Operation Area) eines Traktionswechselrichters. Die Auslegung der Aufbau- und Verbindungstechnik des leistungselektronischen Moduls basiert in der Designphase auf thermischen Simulationsmodellen, was häufig mit FEM-



④ Simulierter und gemessener zeitlicher Temperaturverlauf eines Inverters



⑤ Stationäre Abweichung der simulierten zur gemessenen Temperatur

Programmen erfolgt. Die Qualität der Simulationsergebnisse hängt im Wesentlichen von den Modellparametern, also von den nichtlinearen Materialdaten und der Güte der geometrischen Nachbildung ab. In der Validierungsphase wird der Power-HiL eingesetzt, um verschiedene Soft- und Hardwarestände in Betrieb zu nehmen oder auch verschiedene Leistungstests durchzuführen. Darüber hinaus bietet sich zudem die Möglichkeit, das zuvor benutzte thermische Modell und dessen Parameter zu validieren. Für diesen Test wird die Leistungselektronik so lange in einem Arbeitspunkt gehalten, bis ein quasi stationärer thermischer

Zustand erreicht ist. Für jeden Arbeitspunkt werden dann alle wichtigen Messdaten wie Temperaturen, Phasen- und Zwischenkreisströme und -leistungen erfasst und anschließend ausgewertet.

④ zeigt die zeitlichen Temperaturverläufe an einem Inverter von der Startüber die Aufheizphase bis hin zum thermisch stationären Zustand. Dargestellt sind die simulierten und messtechnisch erfassten Temperaturen an einem IGBT und an einer Diode einer einzelnen Phase.

Die Vorteile des Power-HiLs gegenüber einem Antriebsprüfstand mit drehender Maschine werden bei diesem Beispiel

offensichtlich: Die thermischen Vorgänge in der real drehenden Maschine verursachen Drifteffekte (Magnettemperatur, Phasenstrom) im jeweiligen Arbeitspunkt, sodass dieser nicht stabil angefahren werden kann. Dadurch sind die Messergebnisse nicht reproduzierbar und somit auch nicht vergleichbar mit dem in der Designphase benutzten Simulationsmodell. Anders stellt sich die Situation beim Power-HiL dar: Da das Verhalten der emulierten Maschine durch die Parametrisierung bestimmt wird, ergeben sich ein stabiler Arbeitspunkt und somit reproduzierbare Randbedingungen. Verschiedene Arbeitspunkte können durch eine einfache Umparametrisierung systematisch angefahren werden, bis hin zu den Leistungsgrenzen des Inverters. ⑤ zeigt das ausgewertete Ergebnis einer Messreihe. Dargestellt sind die stationäre Abweichung der simulierten zur gemessenen Temperatur sowie der Einfluss von verschiedenen Modellbedatungen. Die Ergebnisse können nun herangezogen werden, um bestimmte Parameter des Simulationsmodells zu optimieren. Durch diese Möglichkeit der messtechnischen Identifikation von Parametern kann die Simulationsgüte für den nächsten Entwicklungszyklus abermals verbessert werden.

ZUSAMMENFASSUNG

Bei der Entwicklung von leistungselektronischen Komponenten für die Automobilindustrie schließt der Power-HiL die Lücke zwischen einem LV-HiL und dem Systemtest. Hierdurch ist in der Validierungsphase ein Test jeder Einzelkomponente möglich, und das unabhängig von den anderen Komponenten. Die Randbedingungen können durch eine einfache Umparametrisierung der HV-Emulatoren reproduzierbar verändert werden. Neben der systematischen Validierung eröffnet der Power-HiL darüber hinaus die Möglichkeit einer messtechnischen Parameter-Identifikation des Simulationsmodells. Dies schließt den Kreis im V-Diagramm zur Erhöhung der Entwicklungsqualität.