



© Schaeffler, SET Power Systems

## Leistungselektronik ohne E-Maschine testen

### AUTOREN



**Eduard Enderle, M. Eng.**  
ist Teamleiter für  
Leistungselektronik im Bereich  
Systems Engineering - Electrical  
Drive Systems der Schaeffler R&D  
Automotive Division  
bei der LuK GmbH & Co. KG  
in Bühl.



**Dipl.-Ing. (FH) Horst Hammerer**  
ist Geschäftsführer der  
SET Power Systems GmbH  
in Wangen/Allgäu.

Elektrische Antriebssysteme sind oft Teil einer sicherheitskritischen Fahrzeugfunktionalität. Das erfordert eine umfassende Absicherung. Deutlich wird dies am Beispiel Antriebsumrichter. Diese Komponente umfasst neben einer komplexen Signalebene auch Leistungselektronik. Die Testmethodik muss das berücksichtigen. Entwicklungszeiten werden kürzer und das bei gleichzeitig steigenden Funktionsumfängen. Die Herausforderung lautet trotzdem Testqualität und Testtiefe beizubehalten oder gar zu steigern, ohne Aufwand und Ressourceneinsatz zu erhöhen. Eine Lösung besteht im Testen ohne E-Maschine. Am Beispiel der E-Maschinen-Emulatoren von SET Power Systems beschreibt Schaeffler verschiedene Testszenarien und Einsatzmöglichkeiten der E-Maschinen-Emulation.



**BILD 1** Torque-Vectoring-Leistungselektronik für die elektrische Achse von Schaeffler (© Schaeffler)

## E-ANTRIEBS-TOPOLOGIEN

Schaeffler konzipierte auf Basis jahrzehntelanger Erfahrung im Antriebsstrang ein Portfolio an E-Mobility-Produkten: Elektrische Achsen, Hybridmodule und Radnabenantriebe. Dafür wurde ein Modulbaukasten aufgebaut, der sich über Elektronik, Software und Mechanik erstreckt. In feiner Abstufung deckt die Produktpalette alle relevanten Funktionsumfänge von 48 V bis zu Hochvoltssystemen ab (48 V: E-Achse, Hybridmodul, HV: E-Achse, E-Wheel-Drive-Hybridmodul).

Bei der Entwicklung und Serienlieferung des elektrischen Antriebssystems schöpft Schaeffler alle Möglichkeiten aus und kooperiert mit den jeweils auf ihrem Gebiet besten Partnern. Dabei übernimmt Schaeffler die Systemverantwortung. Eine gesamtseinheitliche Betrachtung und hohe Integrationstiefe führt zu einem erheblichen funktionalen Mehrwert bei gleichzeitiger Optimierung der Kosten. Je nach Systemtopologie entstehen dabei unterschiedliche Anforderungen an die Sicherheitsstufe (Automotive Safety Integration Level - ASIL) der Komponenten. Dies beeinflusst auch die Testmethodik.

## NEUE TESTMETHODEN

Auf die stetig wachsende Komplexität mechatronischer Systeme bei immer kürzeren Entwicklungszeiten reagiert

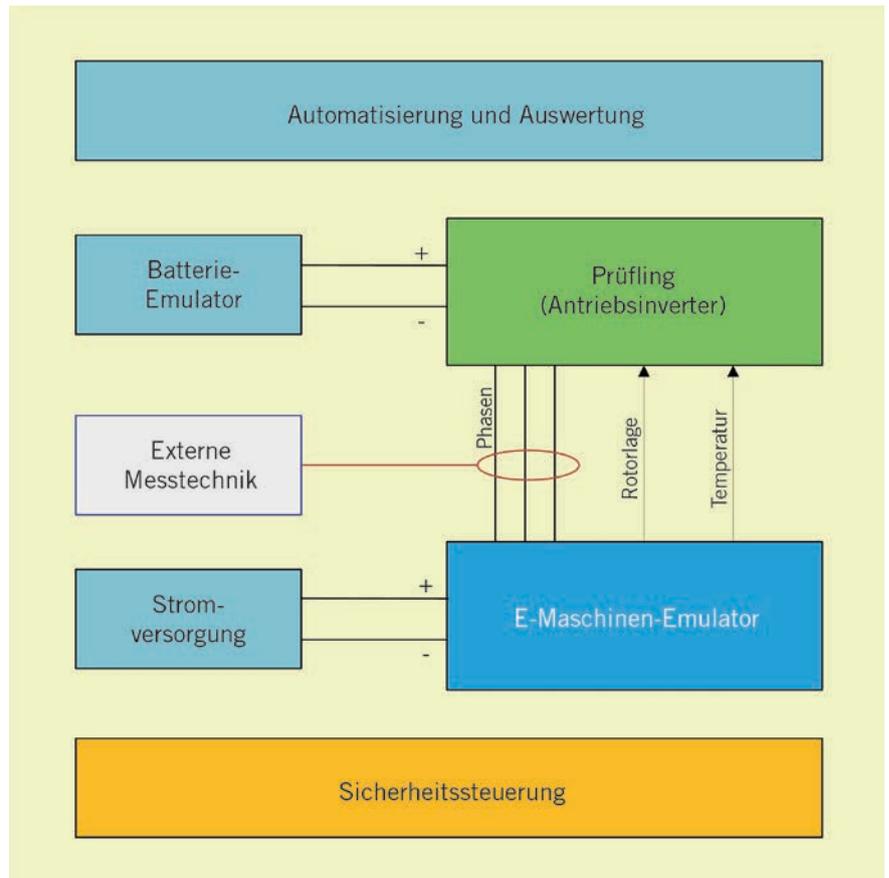
Schaeffler mit einem durchgängigen Standardisierungskonzept über alle Projekte hinweg. Dies gilt für Hardware, Software und Tool-Kette gleichermaßen. Aufgrund der starken Abhängigkeit und Verzahnung von Entwicklungs- und Testvorgehen erhöht sich der Komplexitätsgrad der Systeme und damit zwangsläufig auch die Testkomplexität:

- Komplexe mechatronische Produkte können nicht auf einem Dynamometer-Prüfstand getestet werden (Integrationsproblematik, Separieren einzelner Module zum Testen, mangelhafte Fehlerdarstellung).
- Je nach Projekt wird der Komponententest beim Zulieferer, beim Hersteller oder bei beiden durchgeführt. Die Anforderungen der Systemspezifikation werden erst nach der Systemintegration getestet.
- „Fail Safe“ und „Fail operational“: Systeme müssen zukünftig nicht nur einen „Safe State“ einnehmen können, sondern in einem Fehlerfall „Functional Operational“ bleiben

(elektrische Bremsen und als Vorbereitung für autonomes Fahren). Die 2011 eingeführte Norm ISO 26262 beschreibt erstmals verbindlich die funktionale Sicherheit von Fahrzeugen und den Umgang mit Gefahren, die von E/E-Systemen auf Fahrzeugebene ausgehen können. Ihr Ansatz: Konstruktive und verifizierende Maßnahmen auf verschiedenen Systemebenen sollen zu einer möglichst fehlerfreien und robusten Funktion der E/E-Systeme führen. Dieser Ansatz ist nicht neu und greift jahrzehntelang bewährte Methoden der Luftfahrtindustrie auf (siehe ATZelektronik 4|2015). Die Norm gibt Empfehlungen und Anforderungen zu geeigneten Methoden oder Maßnahmen in Abhängigkeit der ASIL-Einstufung.

## POWER-HIL EMULIERT E-MASCHINE UND LAST

Für die Entwicklung automobiler Leistungselektroniken, **BILD 1**, im Bereich



**BILD 2** Blockschaubild der Komponenten einer Power-HIL-Anlage von SET Power Systems (© SET Power Systems)

Testkontext	Werkzeug	Testziel
Inverter-Software mit virtueller Leistungshardware	Signal-Level-HiL	Funktion der Inverter-Software
Komplette Leistungselektronik mit virtueller E-Maschine	Power-HiL (E-Maschinen-Emulator)	Funktion des Inverters (Originalzustand)
Elektrischer Antriebsstrang mit virtuellem Fahrzeug	Dynamometer	Funktion des Antriebsstrangs

TABELLE 1 Prüfmöglichkeiten der vorhandenen HiL-Anlagen wurden durch Dynamometer-Prüfstände für Leistungselektronik erweitert (© SET Power Systems)

Electrical Drive Systems investierte Schaeffler frühzeitig in eine Power-Hardware-in-the-Loop-Anlage (P-HiL), BILD 2. Damit wurden die Prüfmöglichkeiten der vorhandenen HiL-Anlagen und Dynamometer-Prüfstände für Leistungselektronik erweitert, TABELLE 1.

Die Testmethodik des „Power-HiL“ zum Testen von Antriebsumrichtern ist noch vergleichsweise neu, aber bietet viele Vorteile gegenüber bisherigen Ansätzen. Besonders hervorzuheben ist dabei, dass bei dieser Testtechnologie der Prüfling nicht manipuliert werden muss – eine sehr wichtige Voraussetzung für aussagekräftige Tests. Typische HiL-Aufbauten auf Kleinsignal-

ebene machen hier viele Abstriche. Anders verhält es sich dagegen beim Einsatz eines Dynamometers. Hier kann der Prüfling im unveränderten Zustand nicht nur hinsichtlich seiner Leistungsdaten geprüft, sondern auch die korrekte Funktion der Signalelektronik zusammen mit den Leistungspfaden demonstriert werden. Was sich bei dieser Testmethodik jedoch als nachteilig erweist, ist die mangelhafte Fehlerstimuli-Möglichkeit. Es ist sehr aufwendig, teilweise unmöglich, bei solchen Testständen Fehler zu injizieren. Zudem lassen sich diese nur schlecht reproduzieren oder sie können sogar den Teststand zerstören. Fehlerszenarien an der

E-Maschine, die im späteren Einsatz auftreten können, sind damit also nicht zufriedenstellend nachstellbar. Wenn stimulierte Fehler zu unkontrollierten Phasenströmen führen, kann dies zum Verlust des Prüflings führen.

Ein E-Maschinen-Emulator (Power-HiL) verbindet beide „Welten“: Die elektrische Leistung fließt (abgesichert) real, die mechanische Welt wird in Echtzeit simuliert. Je nach Applikation bietet SET Power Systems E-Maschinen-Emulatoren unterschiedlicher Leistungs- und Spannungsklassen an, um die Verifikationsanforderungen der ISO 26262 nachzuweisen, BILD 3.

BEISPIELE AUS DER TESTPRAXIS

Bei der Entwicklung einer Torque-Vectoring-Leistungselektronik der Schaeffler-E-Achse ergaben sich aus der sicherheitskritischen Applikation (Torque-Vectoring, ASIL Level D) neue Testanforderungen. Dabei nutzten die Entwickler für die Verifikation des Umrichters erstmals die Vorteile eines E-Maschinen-Emulators. Zwei typische Testscenarien aus der Praxis verdeutlichen dies:

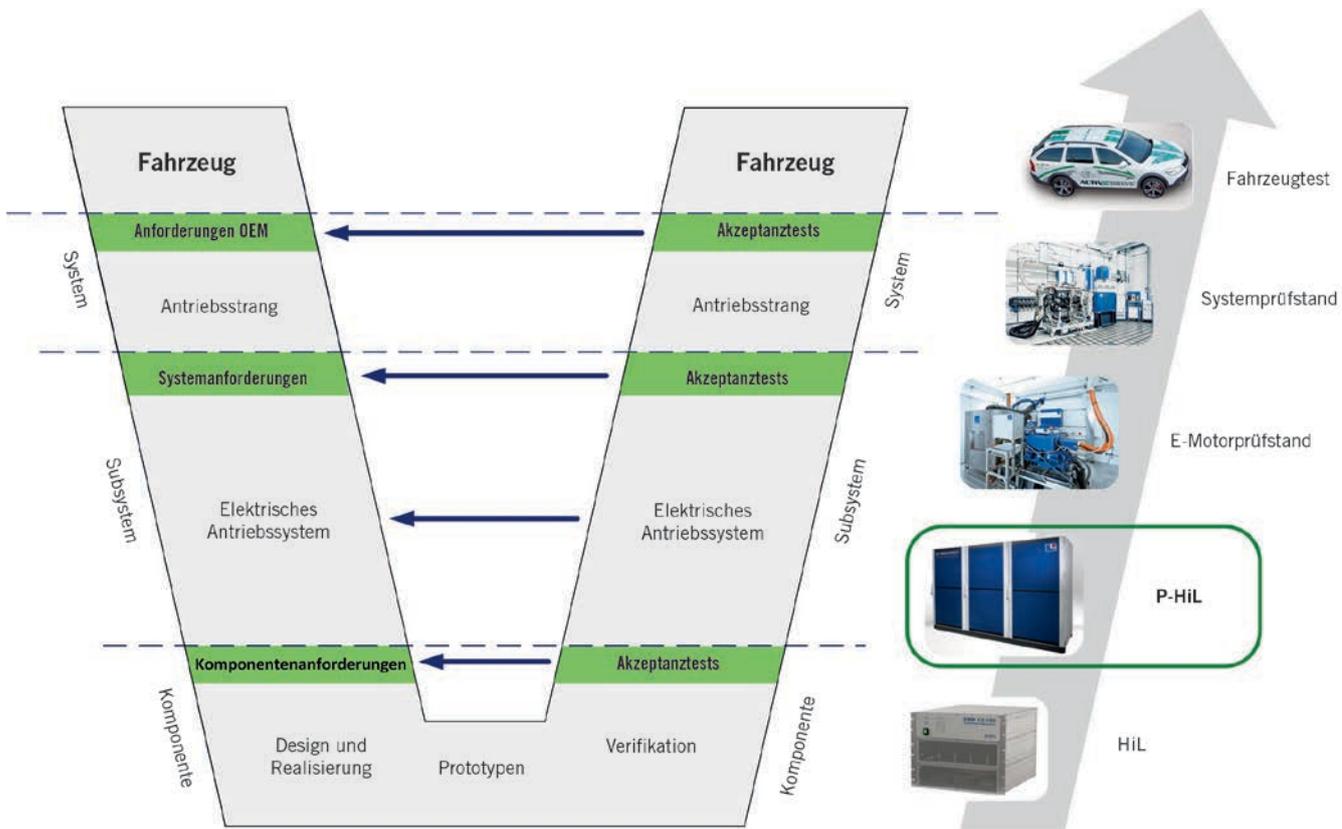


BILD 3 Power-HiL im V-Diagramm: Sie bildet den Lückenschluss zwischen Signal-HiL und Motorprüfständen (© SET Power Systems, Schaeffler, AVL)

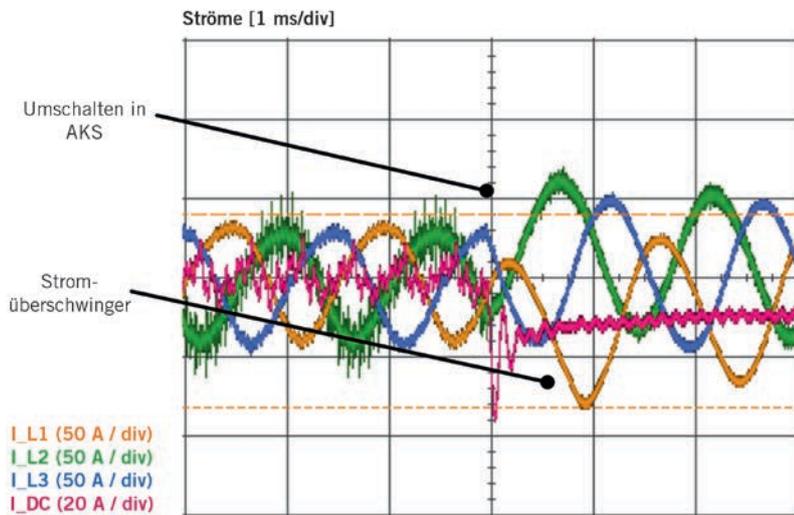


BILD 4 Dynamischer Übergang in den AKS-Betrieb (© Schaeffler)

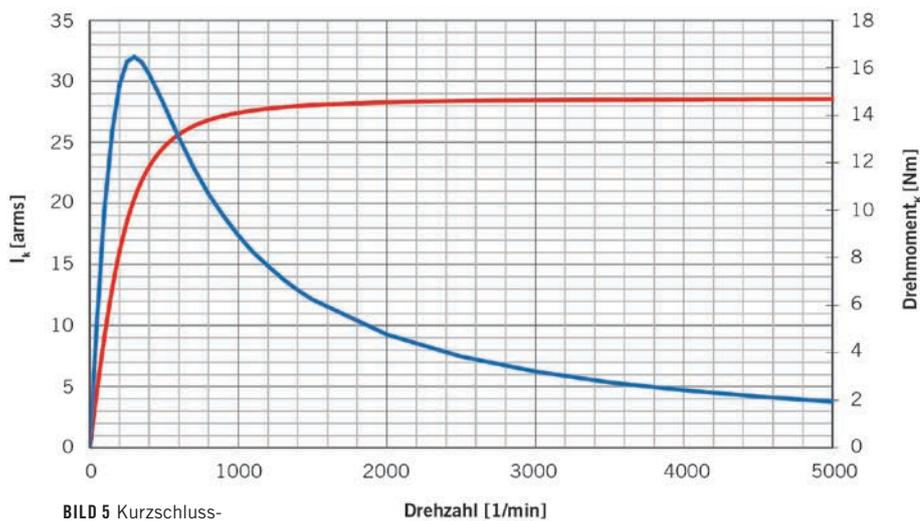


BILD 5 Kurzschlussmoment über Drehzahl im AKS (© Schaeffler)

## AKS ALS SICHERER ZUSTAND

Beim Betrieb von permanenterregten Synchronmaschinen können im Fehlerfall unzulässig hohe Spannungen am Umrichter anliegen. Dies ist beispielsweise dann der Fall, wenn im Hochdrehzahlbetrieb unter Feldschwächung die aktive Regelung des Umrichters versagt. Zum Schutz des Inverters können die Drehstromleitungen des Motors durch die High- oder Low-side-IGBT der B6-Brücke kurzgeschlossen werden. In Abhängigkeit der Motorcharakteristik stellt sich dann ein definierter Kurzschlussstrom ein. Die an den Klemmen messbare Spannung wird nahezu Null, damit verschiebt sich der Fluss der elektrischen Maschine nahezu

vollständig in den Blindleistungsbereich. Das System befindet sich nun in einem sicheren Betriebszustand, dem „aktiven Kurzschluss“ (AKS).

Allerdings erzeugt dieser Betriebszustand in Abhängigkeit von der Drehzahl ein unerwünschtes Bremsmoment. BILD 4 zeigt den Drehmoment und Drehzahlverlauf bei einem Test am E-Maschinen Emulator. Wird der Motor vom äußeren System weiter angetrieben (zum Beispiel beim Abschleppen des Fahrzeugs), müssen für die Auslegung des elektrischen Antriebssystems die Dauerströme in Motor und Elektronik im AKS-Fall beachtet werden.

Mit dem P-HiL lässt sich ein stationärer AKS-Betrieb bei Wunsch-Drehzahlen über

eine beliebige Zeit emulieren. Über mehrere Minuten wurden Drehzahlrampen im Kurzschluss gefahren, um das thermische Verhalten der Leistungselektronik im Dauerkurzschluss zu beobachten. An einem normalen Prüfstand würden hier die mechanischen Größen aufgrund der thermischen Belastung Grenzen setzen.

Im dynamischen Betrieb spielt der Umschaltvorgang zwischen Normal- und AKS-Modus eine wichtige Rolle. Problematisch sind in diesen Situationen die entstehenden transienten Ausgleichsvorgänge beim Zustandswechsel. BILD 5 zeigt die gefährlich hohen Anfangsstromspitzen, gemessen am Power-HiL. Diese pendeln sich aperiodisch auf einen stationären Kurzschlussstrom ein, abhängig von der Drehzahl der E-Maschine. Zu hohe Einschaltströme können die Halbleiterelemente zerstören oder gar die Permanentmagnete des Motors irreversibel entmagnetisieren. Schutzeinrichtungen im Antriebsinverter sorgen jedoch dafür, dass bei diesen Übergangstransitionen zulässige Grenzwerte nicht überschritten werden.

Weitere typische Schutzfunktionen sind Überspannung-, Übertemperatur- und Überdrehzahl-Erkennung, diverse Monitore zur Überprüfung der Resolver-signale sowie Kabelbruch und Kurzschluss-Erkennung. Am Power-HiL können diese komplexen Schutzfunktionen einfach und reproduzierbar verifiziert werden. Mittels Tests an einem originalen Prüfling wird überprüft, ob diese Schutzschaltungen zuverlässig auslösen. Dies erfolgt bei allen möglichen Betriebspunkten und innerhalb der spezifizierten Toleranz, um einerseits den Schutz zu gewährleisten, andererseits unerwünschte Auslösungen im Sinne einer hohen Verfügbarkeit zu verhindern.

Der Power-HiL erweist sich hierbei als das ideale Testwerkzeug. In entwicklungsbegleitenden Tests lassen sich so Dynamik, Sättigung und Kreuzverkopplung im AKS-Betrieb, Robustheit, Fehlerschwellen, Reaktions- und Auslösezeiten am Antriebsumrichter unter voller Leistung im Labor testen.

## OPEN GATE ALS SICHERER ZUSTAND

Eine weitere Schutzfunktion ist das sogenannte „Open Gate“. Zum Schutz von Inverter und Motor vor Überströmen werden hierbei alle IGBTs (Insula-

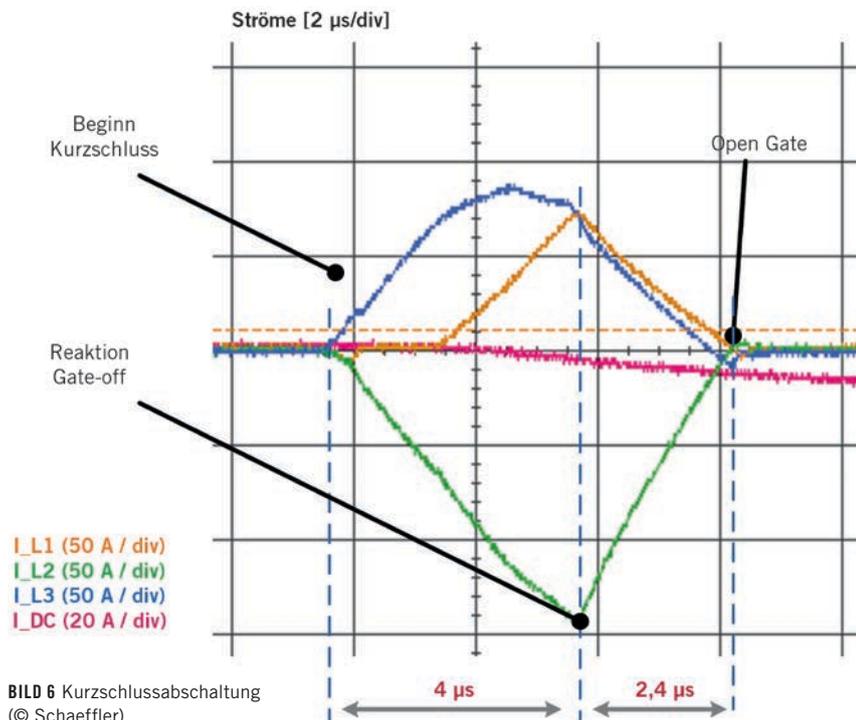


BILD 6 Kurzschlussabschaltung  
(© Schaeffler)

ted-Gate Bipolar Transistor) dauerhaft „ausgeschaltet“, um so den Energiefluss von der Batterie über den Inverter zur E-Maschine zu unterbinden. Der Übergang in den „Open-Gate“-Zustand kann unterschiedliche Ursachen haben. Beim Ausfall eines IGBTs kann, je nach Fehlerbild, nicht mehr in den oben beschriebenen AKS-Zustand gewechselt werden, da sonst ein interner Brückenkurzschluss der B6-Brücke verursacht wird. Wird der Ausfall eines IGBTs erkannt, müssen also Fehlschaltungen verhindert werden. Das gleiche gilt bei beschädigter Isolation der Motoranschlüsse oder wenn Phasenkurzschlüsse diagnostiziert werden. Auch bei Fehlfunktionen in der Signalebene kann ein Wechsel in den „Open Gate“-Zustand erforderlich sein. Besonders kritisch sind Fehlerbilder, die zum gleichzeitigen Durchschalten der oberen und unteren IGBTs führen. Solche Fehler müssen schnell und zuverlässig erkannt werden. Das Abschalten der IGBT-Gates stellt in einem solchen Fall sicher, dass die Leistungselektronik keinen Schaden nimmt.

BILD 6 zeigt beispielhaft hierzu den Stromverlauf der drei Phasen bei einem Phasenkurzschluss und das Auslösen des „Open Gate“-Zustandes. Zirka 4µs nach Auftreten des Fehlers werden

die IGBTs in den „Open Gate“-Betrieb versetzt. Der Strom von L2 (grün) wird innerhalb von circa 2 µs vollständig abgebaut und der Kurzschlusszustand aufgehoben.

Mithilfe von Power-HiL-Anlagen lassen sich solch umfangreiche Überwachungs- und Schutzfunktionen unter realen Verhältnissen an beliebigen Betriebspunkten im Labor überprüfen. Der E-Maschinen-Emulator bildet dabei das statische und dynamische Verhalten der E-Maschine auf der elektrischen Anschlussebene nach. Eine zusätzliche Instrumentierung kann die Reaktionen des Antriebsinverters präzise erfassen und bewerten. Viele Nachweise zur Produkt- und funktionalen Sicherheit können auf diese Weise effizient und reproduzierbar erbracht werden.

**FAZIT UND AUSBLICK**

Um Funktion und Zuverlässigkeit von Antriebsinvertoren sicherzustellen, leisten E-Maschinen-Emulatoren als Power-Hardware-in-the-Loop heute schon einen beachtlichen Beitrag und werden sich als Prüfmethodik in Zukunft weiter etablieren. Ein wichtiges, aber komplexes Kriterium bleibt dabei die Abbildungstreue solcher virtuellen Maschinen gegenüber dem Verhalten einer echten

**DANKE**

Für Ihre wertvollen Beiträge zu diesem Artikel danken wir Herrn Vincent Leonhardt und Herrn Daniel Fritz. Herr Leonhardt ist Hardware-Spezialist im Bereich Systems Engineering der LuK GmbH & Co. KG in Bühl, Herr Fritz Student der Elektrotechnik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

E-Maschine. Automatisierte Verifikationsverfahren werden dies in der Zukunft sicherstellen können. Für den Entwicklungs- und Testalltag bedeutet dies, dass die Trends der Zukunft im Labor schnell getestet werden können. Elektrische Antriebskonzepte lassen sich dann im Labor bereits unter voller Leistung erproben, ohne dass die zukünftige E-Maschine real vorliegen muss. Dadurch lassen sich viele Aufgaben im Entwicklungsprozess eines elektrischen Antriebssystems entkoppeln und parallelisieren, was zu deutlichen Zeit- und Kostenvorteilen führt. Effektivität und Effizienz werden damit nicht nur im Testprozess gewährleistet, sondern bereits in der Entwicklung sichergestellt.

DOWNLOAD DES BEITRAGS  
www.springerprofessional.de/ATZelektronik

READ THE ENGLISH E-MAGAZINE  
order your test issue now:  
springervieweg-service@springer.com

