



# VIRTUELLE E-MASCHINE ALS WERKZEUG IN DER ENTWICKLUNG VON ANTRIEBSREGLERN

Mit der Einführung elektrischer Maschinen im Antriebsstrang von Fahrzeugen ergeben sich vielfältige Möglichkeiten, das Fahrverhalten mittels des Antriebsinverters zu beeinflussen. Die hohe Dynamik von Elektromotoren kann beispielsweise zum Kompensieren von Antriebsstrangschwingungen genutzt werden. Für die Erprobung solcher Regelungsverfahren hat sich eine virtuelle E-Maschine als Power-Hardware-in-the-Loop (PHiL) bewährt. Die Autoren von Daimler und der SET Power Systems stellen diese Lösung vor und weisen auf die hohen Anforderungen in der Abbildungstreue der virtuellen E-Maschine hin.

## AUTOREN



### DIPL.-ING. STEFAN UEBENER

ist Doktorand und arbeitet auf dem Gebiet der E-Maschinenregelung bei der Daimler AG in Sindelfingen.



### DIPL.-ING.(FH) HORST HAMMERER

ist Geschäftsführer der SET Power Systems GmbH in Wangen/Allgäu.

## NEUE MÖGLICHKEIT DER SCHWINGUNGSDÄMPFUNG

Schwingungen im Antriebsstrang sind unerwünscht. Je nach Intensität und Frequenz werden sie vom Fahrer negativ wahrgenommen. Zudem führen Schwingungen im Antriebsstrang zu erhöhtem Verschleiß. Bei der Daimler AG in Sindelfingen findet dieses Thema große Aufmerksamkeit. Insbesondere Elektro- und Hybridantriebe stehen hier vor technischen Herausforderungen. Allerdings ergeben sich auch völlig neue Möglichkeiten zur Schwingungsdämpfung, wenn im Antriebsstrang eine E-Maschine verbaut ist. Diese kann als Kompensations-Aktuator dienen, da seine hohe Drehmomentdynamik eine aktive Schwingungsdämpfung des Antriebsstrangs zulässt. Hierfür werden Algorithmen entwickelt, die der normalen E-Maschinenregelung überlagert werden.

## NEUARTIGE TESTUMGEBUNG ERFORDERLICH

Die Basis für die Entwicklung solcher Kompensationsregler ist ein geeigneter Prüfaufbau. In der Entwicklungsphase sind Fahrzeugtests auf der Straße aufgrund der eingeschränkten Arbeitsweise und mangelhafter Reproduzierbarkeit nicht geeignet. Drehende Systeme mit Lastmaschinen können die erforderliche Drehzahldynamik kaum abbilden.

Die Entwicklung der Daimler AG entschied sich daher für den Einsatz einer virtuellen E-Maschine, eines sogenannten E-Maschinen-Emulators von SET Power Systems. Der Emulator erlaubt Tests mit dem Antriebsumrichter unter voller elektrischer Leistung, jedoch ohne mechanische Begrenzung, die ein Dynamometer-Aufbau mit sich bringen würde. Da ein E-Maschinen Emulator keinen mechanischen Eigenbeitrag liefert, kann das reale mechanische Verhalten des Antriebsstrangs exakt in Echtzeit simuliert werden, während an den Phasenanschlüssen des Antriebsinverters die E-Maschine emuliert wird, ❶.

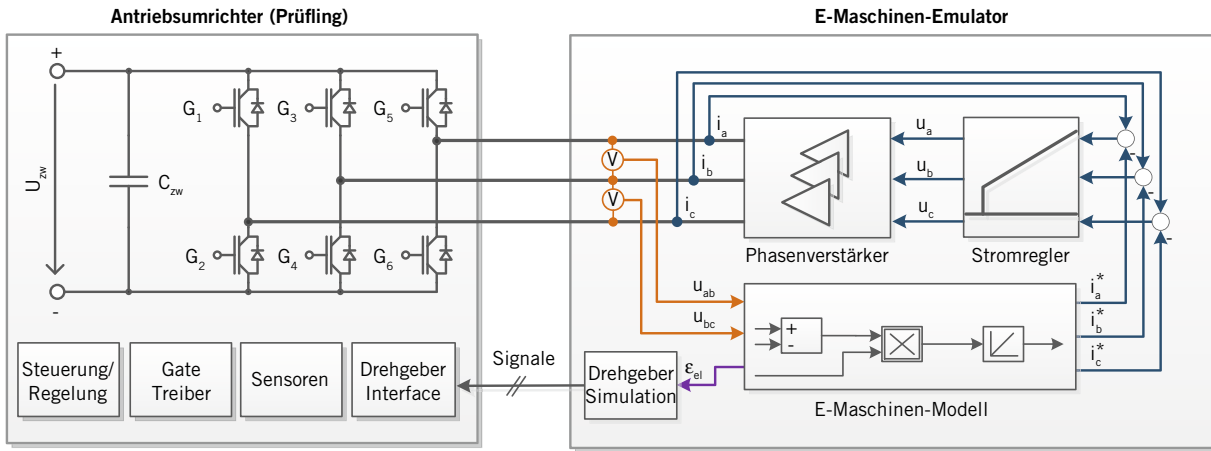
Bei einem Aufbau mit einem Dynamometer kann seitens der E-Maschine von „originalen“ Verhältnissen ausgegangen werden, sofern die richtige E-Maschine zum Einsatz kommt. Allerdings verliert sich diese „Originalität“ hinsichtlich der Drehzahl- und Drehmomentdynamik des gesamten Aufbaus drastisch. Die Last-

maschine mit ihrer Regelung stellt letztlich einen zweiten Antriebsstrang mit hohem Drehmoment aber bescheidener Drehzahldynamik dar. Somit bildet ein mechanisches Lastsystem die realen Eigenschaften des Antriebsstrangs nicht ausreichend gut ab. Der Einsatz eines E-Maschinen-Emulators wirft jedoch eine entscheidende Frage auf. Wie gut bildet der Emulator die originale E-Maschine auf der elektrischen Anschlussseite nach? Kompromisse in dieser Abbildungsgenauigkeit würden den Einsatz eines Emulators zur Untersuchung von Kompensationsreglern in Frage stellen. Eine Validierung des Werkzeugs E-Maschinen-Emulator muss also vorangestellt werden.

## ABBILDUNGSGENAUIGKEIT

Da der Emulator die E-Maschine nachbilden soll, ist die Abbildungstreue, das heißt die Abweichung der emulierten Ströme und Spannungen im Vergleich zur realen Maschine, von entscheidender Bedeutung. Abweichungen an dieser Stelle führen zu Fehlern beim simulierten Drehmoment. Mit zunehmender Drehzahl der virtuellen Maschine kommt der Leistungsfähigkeit der Emulator-Elektronik (Rechen- und Stellgeschwindigkeit, Synchronität von Feld und Rotorposition etc.) immer mehr Bedeutung zu. Besonders wichtig ist hierbei das zugrunde liegende Maschinenmodell im Emulator. Standardmodelle wie das lineare IPMSM-Modell (Synchronmaschine mit vergrabenen Permanentmagneten) haben hier Einschränkungen. Ein Nachteil des linearen Modells ist zum Beispiel, dass Sättigungseffekte in Statorblechen sowie Oberwellen des magnetischen Flusses im Luftspalt vernachlässigt werden. Deshalb wurde dem Emulator ein alternatives, flussbasierendes Maschinenmodell, ❷, zugrunde gelegt, das diese Einschränkungen überwindet.

Dieses flussbasierende Modell muss umfangreich parametrisiert werden, um die Wechselwirkungen und nichtlinearen Zusammenhänge in der E-Maschine genau zu beschreiben. Mittels einer elektrischen Vermessung der originalen Maschine werden diese Daten gewonnen und anschließend durch mathematische Transformationen „modellgerecht“ aufbereitet und in den Emulator geladen. So entsteht eine sehr präzise virtuelle Maschine, die sich auf der elektrischen Anschlussebene wie der originale Motor



1 Funktionsprinzip des E-Maschinen-Emulators

verhält. Als Alternative zur Vermessung der Maschine kann auch eine FEM-Analyse aus den Konstruktionsdaten des Motors die erforderlichen Parameterfelder liefern. Daten, die auf diese Weise generiert wurden, weisen zur Realität zwar gewisse Abweichungen auf, jedoch ergibt sich hier ein enormer Zeitvorteil im Entwicklungsprozess. Während die neue Maschine als Prototyp erst nach einem halben Jahr zur Verfügung steht, kann der Emulator sofort mit den entsprechenden Daten parametrisiert werden, sodass quasi über Nacht der neue Motor als E-Maschinen-Emulator zur Verfügung steht und sofort zur Erprobung und Regler-Auslegung genutzt werden kann. Die eine oder andere Zwischenlösung wird dadurch eingespart und die Erstellung von zusätzlichen Modellen und HiL-Aufbauten lässt sich so geschickt umgehen. Der Entwickler kann dann sofort mit einem Antriebsumrichter seine Regelungstechnik an der neuen virtuellen Maschine gefahrlos erproben.

**FLEXIBILITÄT IN DER DETAILTREUE**

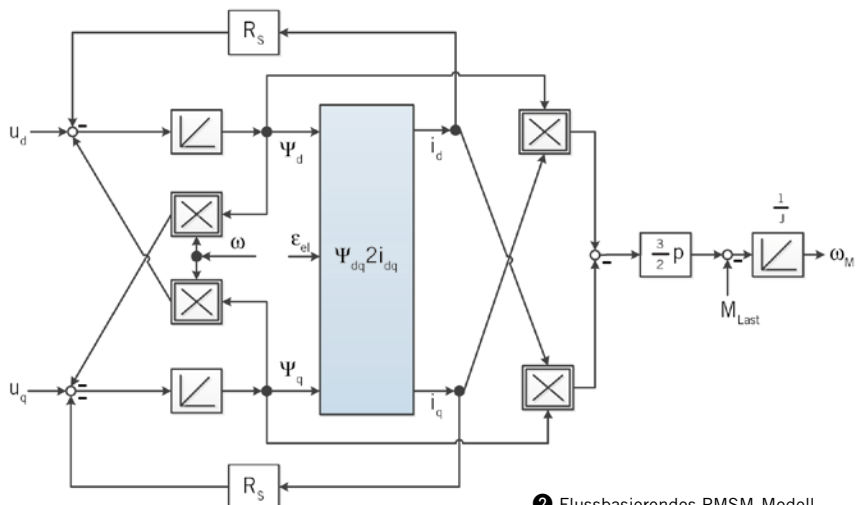
Um den Vorteil der einfachen Parametrierung des linearen Modells gegenüber dem flussbasierten Modell zu behalten, lässt sich der E-Maschinen-Emulator zwischen beiden Modellvarianten umschalten, 2. Somit kann der Anwender anfangs mit einem einfachen linearen Modell arbeiten und nach erfolgter Vermessung der Maschine (oder wenn FEM-Daten verfügbar sind) jederzeit auf das deutlich exaktere flussbasierte Modell umschalten.

**DATENGEWINNUNG AUS EINER REALEN MASCHINE**

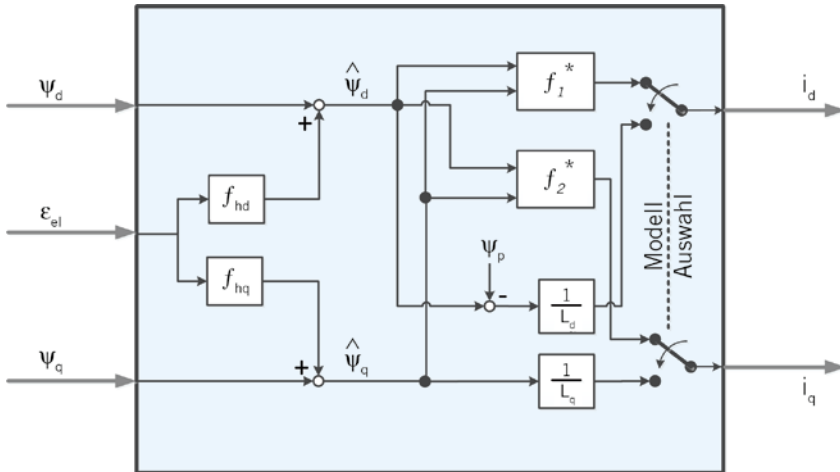
Um die genauen Daten einer E-Maschine zu gewinnen, muss diese vermessen werden. Die dabei gewonnenen mehrdimensionalen Kennfelder beschreiben die Eigenschaften der Maschine unter Berücksichtigung von Nichtlinearitäten und Oberschwingungen. Zusammengefasst ergibt sich ein einfaches nachvollziehendes Ablaufschema für den Einsatz eines E-Maschinen Emulators auf der Basis von Messdaten oder, alternativ, einer FEM-Analyse. Die genauesten Daten erhält man durch die Charakterisierung einer originalen Maschine. Eine ausführliche Beschreibung der Modell-Datengewinnung und Validierung des E-Maschinen-Emulators ist in [1] zu finden.

**VALIDIERUNG**

Auf den ersten Blick erscheint diese Aussage widersprüchlich. Originalität ist nicht steigerungsfähig. Wenn man sich jedoch vor Augen führt, dass Elektromotoren Fertigungstoleranzen unterliegen, muss sich der Anwender fragen, welches der Originale er gerade einsetzt. Mittels repräsentativen Vergleichsmessungen [1] wurde für den E-Maschinen-Emulator der SET Power Systems GmbH eine Abweichung zur realen Maschine von nur wenigen Prozent ermittelt, die deutlich unter der Fertigungstoleranz eines typischen Elektromotors liegt. Insofern kann dieser Emulator numerisch nahezu korrekt die Eigenschaften der Maschine abbilden und unterliegt nicht den üblichen Maschinentoleranzen. Einem Einsatz des



2 Flussbasierendes PMSM-Modell

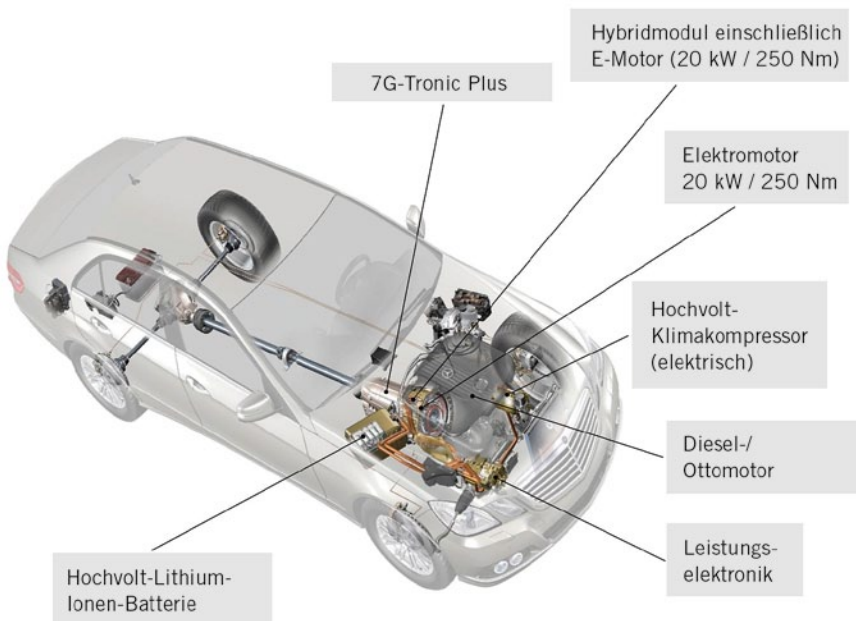


3 Flussblock im Modell mit Umschaltmöglichkeit

Emulators für Anwendungen wie Verifikation der Maschinenregelung, Lebensdaueruntersuchungen von Umrichtern oder Wirkungsgradoptimierung steht somit nichts entgegen.

#### UNTERSUCHUNG DER AKTIVEN SCHWINGUNGSDÄMPFUNG

Der E-Maschinen-Emulator der SET Power Systems GmbH wird in der Pkw-Entwicklung der Daimler AG zum Testen und Applizieren von Antriebsumrichtern eingesetzt. Eines der Zielfahrzeuge war dabei der Mercedes-Benz E 300 BlueTEC Hybrid – ein Fahrzeug mit einem Hybridantriebsstrang. Bei dieser Konfiguration kann die vor dem Getriebeeingang sitzende E-Maschine durch eine Anfahrkupplung vom Verbrennungsmotor abgekoppelt werden, wodurch eine rein elektrische Traktion möglich ist. 4 veranschaulicht den hybriden Antriebsstrang mit den entsprechenden Hochvoltkomponenten.



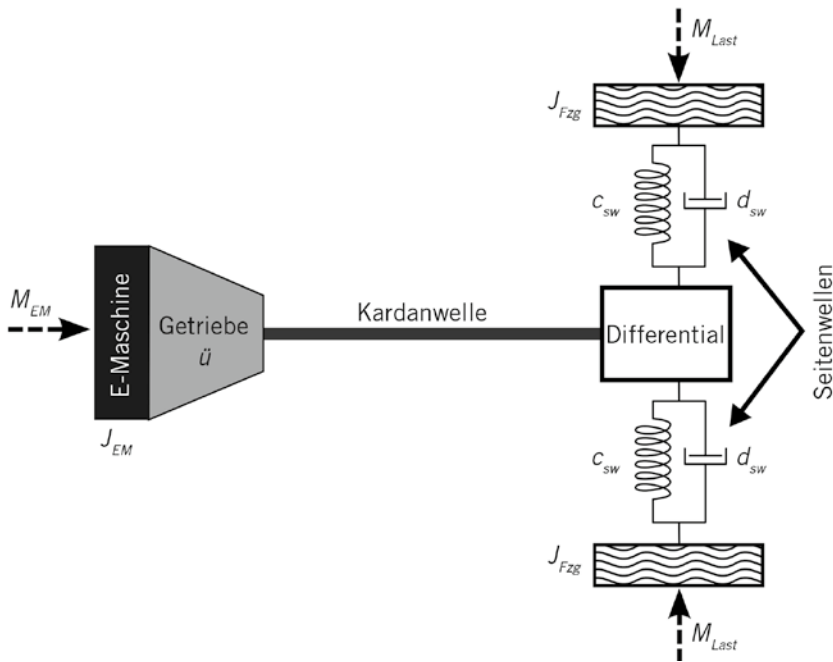
4 Antriebsstrang des Mercedes-Benz E 300 Blue TEC Hybrid

# GAME CHANGING TECHNOLOGY

## INVERTER TEST WITH VIRTUAL E-MOTOR

- Outstanding Dynamics
- No Mechanical Limitations
- Fault Injection
- No Rotating Parts

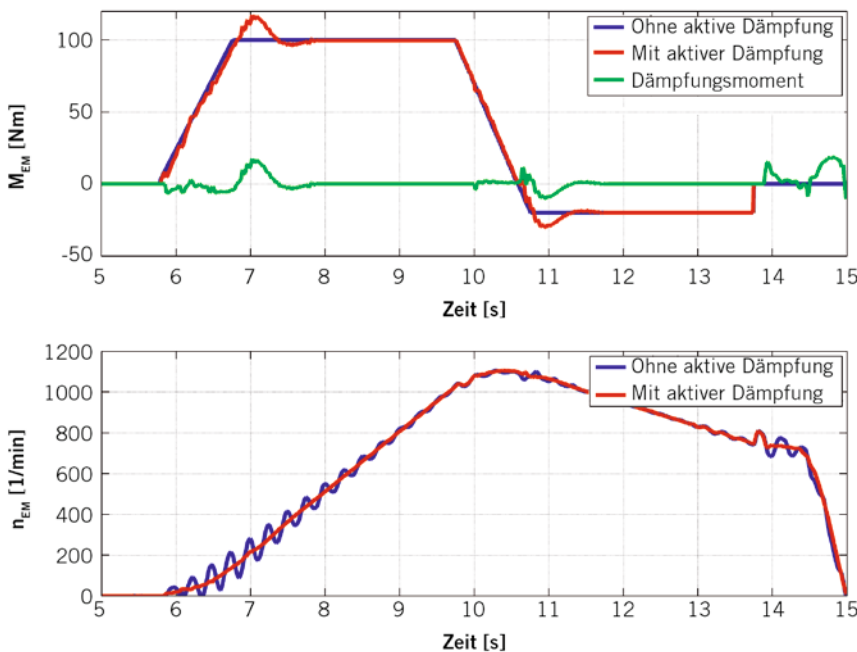




5 Schematische Darstellung des Feder-Dämpfer-Systems im Antriebsstrang

Bedingt durch die Anordnung der E-Maschine sind Zwischenzustände mit offener Kupplung und Getriebe im Leerlauf möglich, bei dem sehr hohe Drehzahlgradienten auftreten können. Diese hohen Drehzahländerungen müssen am Prüfstand nachgestellt werden, um bei-

spielsweise die Stabilität der Stromregler validieren zu können. Konventionelle Lastprüfstände bilden allerdings wegen des hohen Trägheitsmoments der Lastmaschine schnelle Drehzahländerungen nur bedingt nach. Eine weitere Eigenschaft des Hybridantriebsstrangs ist



6 Untersuchung der aktiven Dämpfung am E-Maschinen-Emulator

seine Anfälligkeit zu Drehschwingungen. Die E-Maschine hat im Vergleich zum konventionellen Antrieb ein großes Trägheitsmoment, weshalb diese zusammen mit den Seitenwellen und der Fahrzeugmasse einen Zweimassenschwinger mit Feder-Dämpferelementen bildet, 5. Als weichste Elemente des Antriebsstrangs sind die Seitenwellen anfällig für wahrnehmbare Schwingungen. Die resultierenden Resonanzfrequenzen sind niederfrequent und stellen für den Fahrer einen Komfortverlust dar. Um dennoch einen hohen Fahrkomfort zu gewährleisten, wird die hohe Drehmomentdynamik der E-Maschine zur aktiven Dämpfung der Drehschwingungen ausgenutzt.

Bei der Nachbildung von Drehschwingungen stoßen Lastprüfstände aufgrund der hohen Trägheitsmomente der Lastmaschinen an ihre Grenzen. Der E-Maschinen-Emulator bietet hier einen wesentlichen Vorteil, denn die Mechanik wird nur simuliert und ist dadurch in der Drehzahldynamik praktisch nicht begrenzt. Die Drehschwingungen im Antrieb können numerisch durch folgendes Differentialgleichungssystem simuliert werden, Gl. 1:

	$J_{EM} \ddot{\varphi}_{EM} = M_{EM} - \frac{c_{sw}}{i^2} (\varphi_{EM} - \varphi_{Rad} \ddot{u}) - \frac{d_{sw}}{i^2} (\dot{\varphi}_{EM} - \dot{\varphi}_{Rad} \dot{u})$
GL. 1	$\frac{J_{FzG}}{i^2} \ddot{\varphi}_{Rad} \ddot{u} = \frac{c_{sw}}{i^2} (\varphi_{EM} - \varphi_{Rad} \ddot{u}) + \frac{d_{sw}}{i^2} (\dot{\varphi}_{EM} - \dot{\varphi}_{Rad} \dot{u}) - \frac{M_{last}}{i}$

Bei Vernachlässigung der Massen der Wellen und der Getriebe sind die Trägheitsmomente des Fahrzeugs  $J_{FzG}$  und der E-Maschine  $J_{EM}$  ausschlaggebend. Die Federkonstante  $c_{sw}$  sowie die Dämpfungskonstante  $d_{sw}$  werden durch die mechanische Auslegung der Seitenwellen bestimmt. Aufgrund des Bestrebens, die Reibungsverluste zu minimieren, ist die natürliche Dämpfung des Systems sehr gering. Die Dämpfung des Gesamtsystems kann durch das Einbringen eines zusätzlichen Drehmoments durch die E-Maschine erhöht werden und so den Fahrkomfort deutlich steigern, Gl. 2.

GL. 2

$$M_{EM}^{Damp} = -K_p(\dot{\phi}_{EM} - \dot{\phi}_{Rad}\ddot{u})$$

Zum Test und zur Applikation der Softwarekomponenten für die aktive Schwingungsdämpfung wurde der E-Maschinen-Emulator mit einem Antriebsstrangmodell verbunden, das auf einer echtzeitfähigen Plattform läuft. Diese Anordnung kann realistische Lastprofile, die am realen Antrieb auftreten, nachbilden. Bisher war die Untersuchung der aktiven Dämpfungsfunktion nur im Fahrzeug sinnvoll möglich und kann nun reproduzierbar am E-Maschinen-Emulator durchgeführt werden. 6 zeigt einen Versuch, der am Emulator jeweils einmal mit und ohne aktiver Dämpfung aufgenommen wurde. Am Maschinendrehzahlverlauf wird der Einfluss der aktiven Dämpfung durch die E-Maschine verdeutlicht.

## FAZIT

Durch den E-Maschinen-Emulator haben Ingenieure in der Entwicklung von Antriebsumrichtern nun die Möglichkeit, Systemtests unter Leistung reproduzierbar im Labor durchzuführen und Regelalgorithmen systematisch zu optimieren. Die Anzahl der erforderlichen Fahrtests kann drastisch reduziert werden, was letztlich Kosten reduziert und Entwicklungszyklen verkürzt. Die präzise Abbildung der E-Maschine durch ein geeignetes flussbasiertes Modell ermöglicht ein wirklichkeitstretues Verhalten auch bei sehr dynamischen Drehzahländerungen. Darüber hinaus ergeben sich neue Einsatzfelder wie der Vergleich von Wirkungsgraden bei unterschiedlichen Regelungsstrategien oder der Einsatz als eine repräsentative Motorlast für Lebensdaueruntersuchungen.

## LITERATURHINWEIS

[1] Uebener, S.; Böcker, J.: Application of an Electric Machine Emulator for Drive Inverter Tests within the Development of Electric Drives, European Electric Vehicle Congress, Brüssel, 2012, www.set-powersys.de



### DOWNLOAD DES BEITRAGS

[www.springerprofessional.de/ATZelektronik](http://www.springerprofessional.de/ATZelektronik)



### READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

order your test issue now:  
[springervieweg-service@springer.com](mailto:springervieweg-service@springer.com)

**BESUCHEN SIE UNS AUF DER AABC EUROPE VOM 24. - 28. JUNI IN STRASBOURG, STANDNUMMER 9 [WWW.ADVANCEDAUTOBAT.COM](http://WWW.ADVANCEDAUTOBAT.COM)**



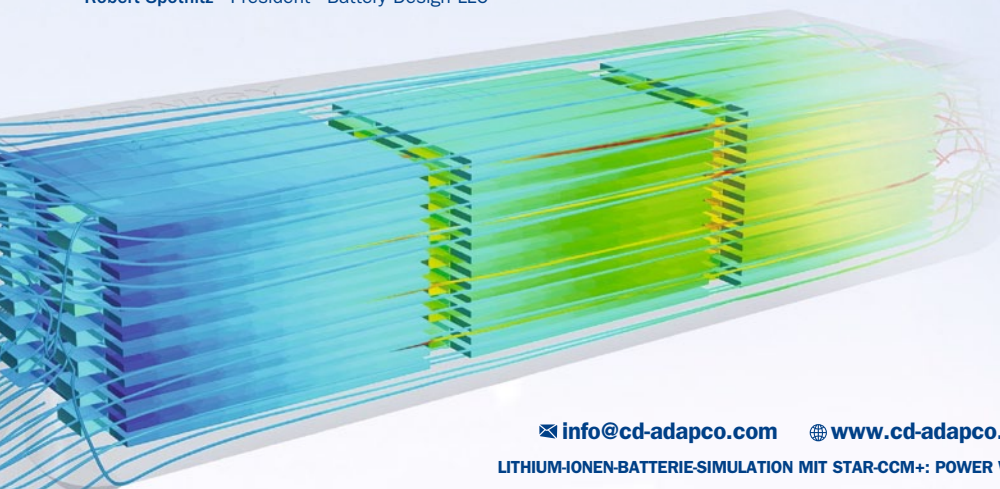
## STAR-CCM+: Lösungen für die Batteriemodellierung

Vollständig integrierte Strömungs- und Wärmesimulation vom einfachen Schaltkreis bis hin zur kompletten Elektrochemie für Lithium-Ionen-Zellen, Packs und Fahrzeuginstallationen.

CD-adapco ist der führende Anbieter der gesamten Bandbreite technischer Simulationslösungen (CAE) für Strömung, Wärmeübergang und Struktur.

**„CD-adapco entwickelt zur Zeit eine umfassende Lösung zur Modellierung von Batterien innerhalb von STAR-CCM+. Es ist ein Vergnügen gemeinsam mit CD-adapco an diesem Projekt zu arbeiten.“**

Robert Spotnitz - President - Battery Design LLC



✉ [info@cd-adapco.com](mailto:info@cd-adapco.com) 🌐 [www.cd-adapco.com](http://www.cd-adapco.com)

LITHIUM-IONEN-BATTERIE-SIMULATION MIT STAR-CCM+: POWER WITH EASE.