

E-MASCHINEN-EMULATOR KONTRA ROTIERENDEM PRÜFSTAND

Die Frage, ob die modellbasierte Echtzeit-Emulation der E-Maschine einen herkömmlichen rotierenden Prüfstand mit Belastungsmaschine ersetzen kann, ist in der Fachwelt umstritten. Für die Entwicklung von hybriden Antriebssträngen setzt ein süddeutscher Automobilhersteller erstmals ein Inverter-Komplett-Prüfsystem mit integriertem E-Maschinen-Emulator der SET GmbH ein. Untersucht wurde insbesondere die Abbildungsgenauigkeit des Emulators.

AUTOREN



DIPL.-ING. (FH) HORST HAMMERER
ist Mitglied der Geschäftsleitung der SET GmbH in Wangen, Allgäu.



DIPL.-ING. (FH) DIETER STRAUSS
ist freier Autor für Technikthemen und arbeitet in Olching bei München.

WERKZEUGE FÜR DIE STEUERGERÄTEENTWICKLUNG

Für die Entwicklung eines Steuergeräts zur Drehmomentregelung einer E-Maschine im hybriden Antriebsstrang gehören Verfahren wie Model-in-the-Loop (MiL) und Software-in-the-Loop (SiL) zum Stand der Technik. Sobald der Prototyp des Steuergeräts in Hardware realisiert wurde, erfolgt üblicherweise das Testen auf einem Hardware-in-the-Loop-Prüfstand (HiL). Die Steuergerätelektronik und der Regler sind bereits real vorhanden, die E-Maschine wird simuliert. Zu diesem Zeitpunkt fehlt noch die Hochvolt-Leistungselektronik. Die Lastströme werden vom HiL-Prüfstand berechnet und die entsprechenden Werte der Steuerung vorgegeben.

HERKÖMMLICHER STEUERGERÄTETEST MIT E-MASCHINE UND DYNAMETER

In der nächsten Teststufe wird meist ein Lastprüfstand genutzt, bei dem im einfachsten Fall die original E-Maschine des hybriden Antriebsstrangs mit einer anderen geregelten E-Maschine gekoppelt wird. Mit dieser E-Maschinen-Dynamometer-Konfiguration wird der reale E-Antrieb zusammen mit dem realen Steuergerät getestet, das in dieser Teststufe bereits die Hochvolt-Leistungselektronik beinhaltet.

Bei dieser Vorgehensweise besteht das Problem, dass der rotierende Prüfstand selbst einen Antriebsstrang mit Wellen und Lastmaschine darstellt, der dem im späte-

ren Fahrzeug in keinsten Weise entspricht. Aus dem Fahrzeug kommende Rückwirkungen und Drehzahldynamiken kann er nur sehr schlecht darstellen. Das ist ein gravierender Nachteil, denn gerade bei Hybridantrieben ist die E-Maschinen-Drehzahl nicht immer an die Fahrzeuggeschwindigkeit gekoppelt. Es gibt Zwischenzustände, bei denen ein Getriebe offen ist und kein Abtrieb zu den Rädern existiert. In diesem Fall arbeitet die E-Maschine schlagartig ohne Belastung. All diese Drehzahldynamiken lassen sich auf dem rotierenden Prüfstand nicht darstellen, weil die trägen Massen zu stark vom späteren Fahrzeug abweichen. Die Konsequenz war, dass die Regelung in einem Testfahrzeug auf der Straße erprobt und parametrisiert werden musste. Die Lücke, die sich zwischen HiL-Prüfstand und dem Test im Auto auftut, schließt nun das Inverter-Komplett-Testsystem der SET GmbH, ❶. Mit diesem System lassen sich die im realen Fahrbetrieb an einem Antriebsumrichter auftretenden Last- und Umgebungsbedingungen exakt reproduzierbar im Labor nachbilden. Ein konsequentes Front-Loading von Straßentests hin zu Komponententests am Prüfstand reduziert Kosten, minimiert Entwicklungszyklen und erzeugt Testdaten mit höherer Qualität.

TEST MIT E-MASCHINEN-EMULATOR

Die zentrale Komponente bei der neuen Lösung, ❷, ist der E-Maschinen-Emulator mit seiner Zwei-Quadranten-Hochvolt-DC-



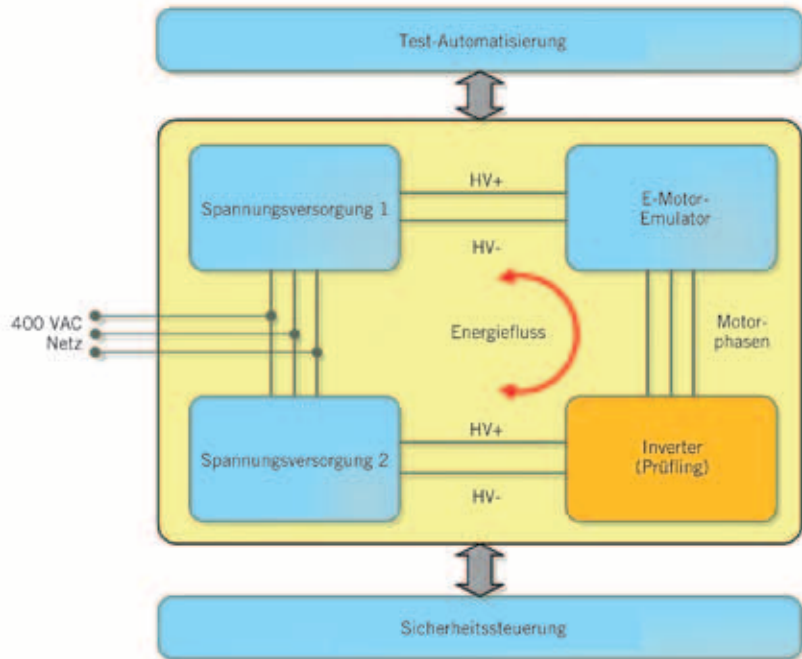
❶ Betrieb eines Inverters auf dem Testsystem von SET

Versorgung. Zwei Stromversorgungen stehen zur Verfügung: Eine für den E-Maschinen-Emulator und eine für den Prüfling, sodass das Steuergerät mit unterschiedlichen Spannungen getestet werden kann. Spannungsschwankungen der HV-Batterie Versorgung lassen sich damit nachbilden. Der Energiefluss schließt sich über die Stromversorgungen. Eine Sicherheitssteuerung sowie eine Testautomatisierung ergänzen das System.

Der E-Maschinen-Emulator ist eine modellbasierte Nachbildung des E-Motors, den das Steuergerät bestehend aus Regler, Steuerungslogik und Frequenzumrichter steuern soll. Durch die Modellbasierung kann der Emulator jede E-Maschine per Software nachbilden. Der Anwender gibt die elektrischen und mechanischen Daten der spezifischen E-Maschine wie Impedanzen, Polpaarzahl, magnetische Flüsse, Trägheitsmasse, Reibung etc. in der grafischen Bedienerschnittstelle vor.

Auch Nichtlinearitäten und verschiedene Abhängigkeiten des magnetischen Flusses lassen sich abbilden. Auf diese Weise entsteht eine originalgetreue virtuelle E-Maschine, die auch beim Betrieb in Grenzbereichen, zum Beispiel bei Feldschwächung ein korrektes Verhalten emuliert. Beim Feldschwächebetrieb stellt der Umrichter nicht nur einen drehmomentbildenden Phasenstrom (I_q) sondern auch einen feldschwächenden Strom (I_d) ein, damit das Feld der Dauermagnete einer E-Maschine geschwächt und somit die Gegen-EMK verringert wird. Erst durch die korrekte Emulation einer Feldschwächung können Arbeitspunkte bei hohen Drehzahlen angefahren und die erhöhten Verluste im Prüflings-Inverter bei konstanter Motorleistung und sinkendem Drehmoment bestimmt werden.

Abhängig von den Leistungsdaten des zu emulierenden Motors werden die anderen Prüfsystemelemente ausgelegt. Dazu gehören die Spannungsversorgungen für das Prüfobjekt, in diesem Fall das Steuergerät mit Regler und Wechselrichter, die Aufnahmevorrichtung für das Prüfobjekt und die Kühlungseinrichtung. Im Vergleich zu einem Simulator fließen bei einem Emulator große Ströme. Die dafür erforderliche Leistungselektronik muss zuverlässig gekühlt werden. Ein Rechner mit integrierten Funktionen zur Sicherstellung der Betriebssicherheit komplettiert den Aufbau des Prüfsystems.



2 Schematischer Aufbau des Inverter-Komplett-Prüfsystems mit integriertem E-Maschinen-Emulator

EXAKTE ABBILDUNG DER REALEN E-MASCHINE

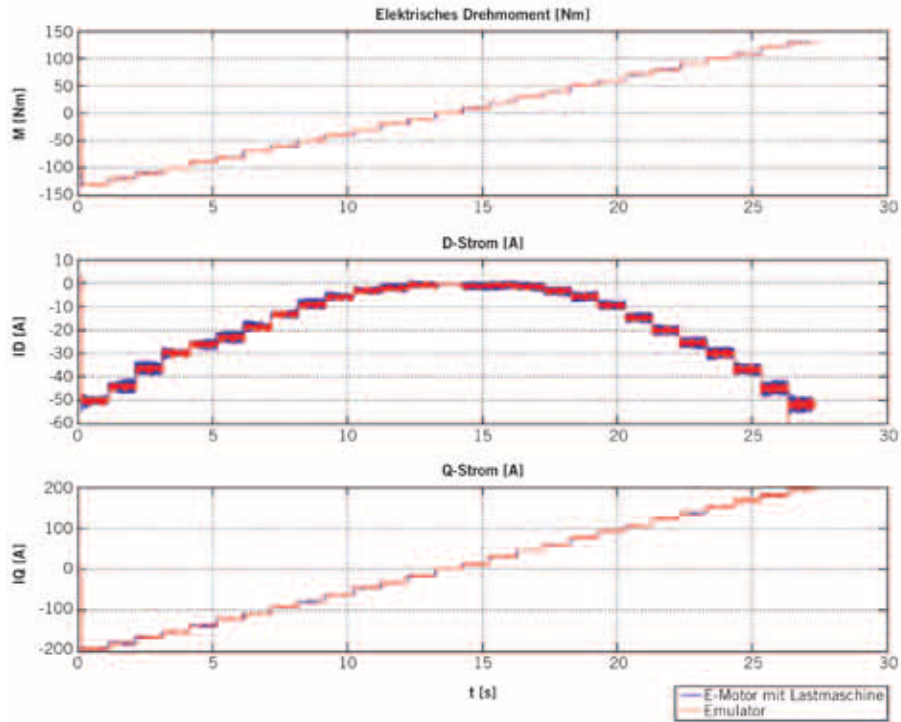
In den ersten Tests nach Inbetriebnahme galt es zu prüfen, ob sich der E-Maschinen-Emulator wie ein rotierender Prüfstand verhält. Auf einem Lastprüfstand wurden die statischen und dynamischen Kennlinien einer E-Maschine messtechnisch erfasst. Aufgezeichnet wurden beispielsweise Ströme, Beschleunigungswerte und transformierte Spannungen. Im nächsten Schritt wurden die Daten der E-Maschine wie Fluss- beziehungsweise Drehmoment-Konstante, Massenträgheit, Impedanzen, Reibung und weitere Kenndaten in den Emulator eingegeben und die gleichen Tests wie auf dem Lastprüfstand durchgeführt. Der Vergleich der Messschriebe, 3 und 4, zeigt, dass die Daten des Emulators deckungsgleich mit denen des Lastprüfstands sind. Somit verhält sich der Emulator wie der reale Motor und stellt nicht nur eine grobe Annäherung dar.

Auch im dynamischen Betrieb verhält sich der Emulator wie die reale E-Maschine. Der rotierende Prüfstand weicht dagegen wegen der Massenträgheit des Dynometers und dessen begrenzter Regeldynamik von den erwarteten Werten ab, 4. Er ist

damit nur begrenzt geeignet, um das dynamische Verhalten der E-Maschinen-Drehzahl abzubilden. Ein Beispiel: Eine reale E-Maschine weist Nichtlinearitäten auf, die zu harmonischen Oberwellen auf dem Drehmomentverlauf führen. Diese Oberwellen werden durch Nichtlinearitäten der E-Maschine verursacht. So sind beispielsweise die magnetischen Kennlinien von Rotor und Stator nur annähernd linear. An dem Inverter-Komplett-Testsystem lassen sich Oberwellenverhalten und mögliche regelungstechnische Strategien genau studieren, 5.

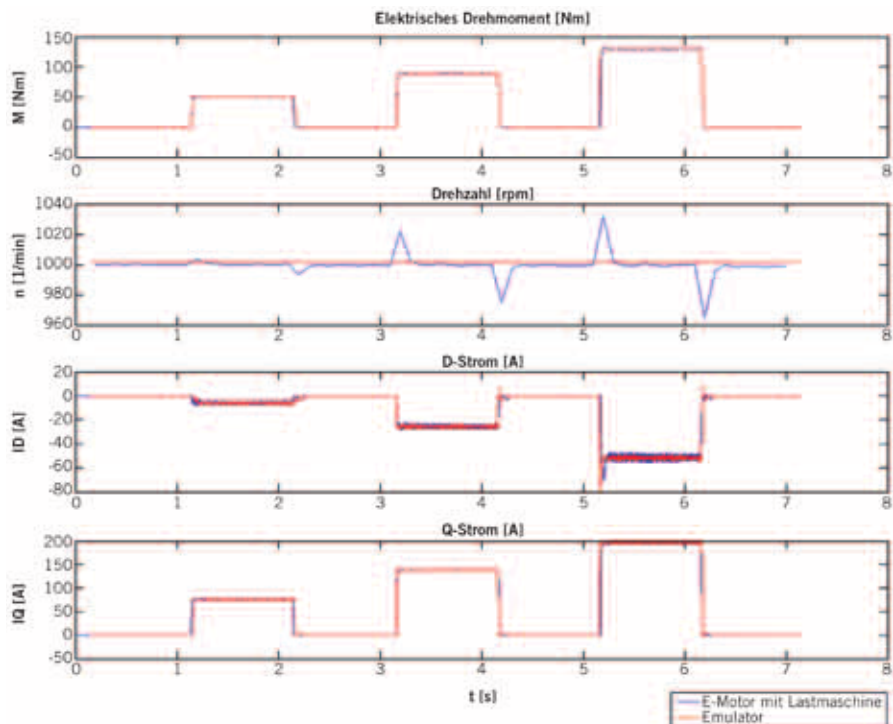
VORTEILE DER EMULATOR-LÖSUNG

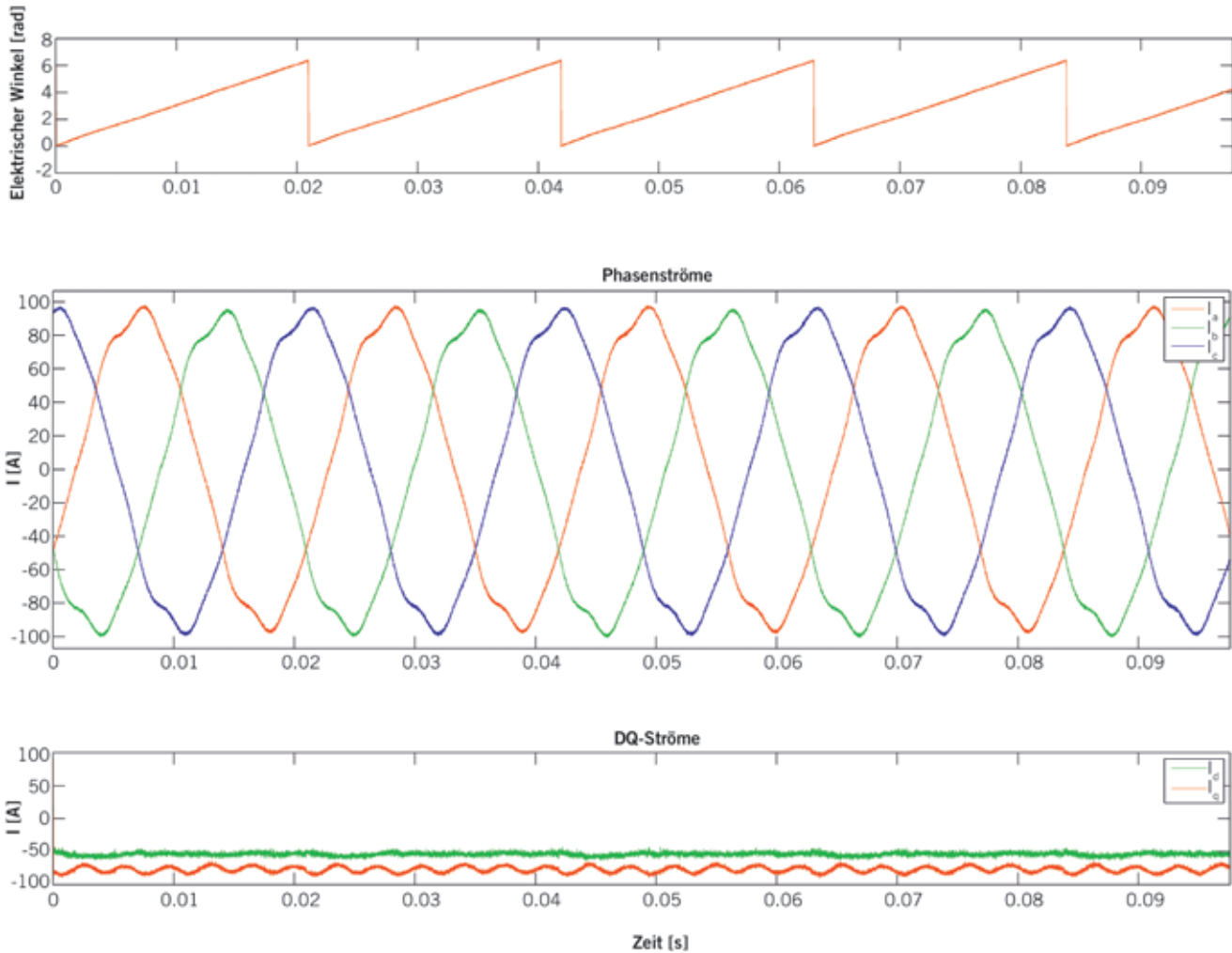
Das Inverter-Komplett-Testsystem unterstützt den parallelen Entwicklungsprozess von E-Maschine und Steuergerät. Während das eine Entwicklerteam die E-Maschine konstruiert, kann ein anderes einen Prototyp des Steuergeräts aufbauen und erste Tests am E-Maschinen-Emulator durchführen. Mittels FEM-Analysertools lassen sich schon im Vorfeld aus den Konstruktionsdaten der E-Maschine deren Kenngrößen ableiten und in den Emulator einspeisen. Das Entwicklerteam führt damit erste Reglertests durch, obwohl die E-Maschine real noch gar nicht existiert. Der große Vorteil



③ Das Testsystem verhält sich wie ein Lastprüfstand, jedoch ohne Kompromisse in der Drehzahlndynamik. Zum Vergleich wurde bei einer festen Drehzahl eine Drehmoment-Rampe an einem Aufbau mit realer Lastmaschine sowie am Inverter-Testsystem durchfahren und die Messergebnisse übereinander gelegt

④ Bei der zweiten Messreihe wurde das Drehmoment sprungartig verändert. Hier zeigt sich die hohe Dynamik des Emulators gegenüber der Lastmaschine, bei der unerwünschte Drehzahlschwankungen auftreten





5 Auswirkung von Fluss-Harmonischen auf das Drehmoment: Der drehmomentbildende Phasenstrom (I_q) erzeugt eine 300-Hz-Modulation des Drehmoments, verursacht durch die simulierte fünfte und siebte Oberwelle. Dieses dynamische Verhalten kann ein Lastprüfstand nicht abbilden

besteht darin, dass die Testergebnisse in dieser frühen Phase noch für Optimierungen des E-Maschinen-Designs genutzt werden können.

Ein weiterer Vorteil betrifft die Leistungselektronik. Mit realen Fahrprofilen, die von Testfahrzeugen aufgenommen wurden, kann man realistische Belastungstests für die Leistungselektronik durchführen, die automatisiert Tag und Nacht laufen können.

Der wichtigste Vorteil besteht in der kompletten modellbasierten Abbildung des Fahrzeug-Antriebsstrangs mit dessen inhärentem Schwingungsverhalten. Bei dieser Aufgabenstellung leiden Dynamometer systembedingt unter der geringen Drehzahl-Bandbreite von wenigen Hertz, wogegen die extreme Dynamik des Emulators die Schwingungen exakt emulieren kann. Mit dem Emulator lassen sich die

entsprechenden Dämpfungsalgorithmen der Umrichter-Software nun im Labor realitätsnah und reproduzierbar testen.

FAZIT UND AUSBLICK

Mit dem Inverter-Komplett-Testsystem von SET kann bei der Entwicklung von hybriden Antrieben und anderen Antrieben mit E-Maschinen sehr früh in den Entwicklungs- und Testprozess eingegriffen werden. Mithilfe des integrierten Emulators ist jeder E-Maschinentyp nachbildbar. Im Vergleich zu rotierenden Prüfständen verhält sich der Emulator auch im Drehzahl-dynamischen Betrieb wie die entsprechende reale E-Maschine. Außerdem werden Entwickler in die Lage versetzt, Phänomene genau nachzustellen, die heute noch nicht von der Regelung berücksichtigt werden. Dazu gehören zum Beispiel die harmoni-

schen Oberschwingungen von E-Maschinen und die regelungstechnische Auslöschung von akustischen Effekten.

Über Entwicklungstests an Invertern für E-Maschinen hinaus kann das Testsystem auch für andere Aufgabenstellungen wie Systemtests oder Tests am Bandende eingesetzt werden. Dabei kommt dem System zugute, dass es sich aus der Sicht des Prüfling-Inverters wie eine reale E-Maschine darstellt, aber ohne rotierende Teile auskommt.

DOWNLOAD DES BEITRAGS
www.ATZonline.de

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

03 | 2012 _ Juni 2012 _ 7. Jahrgang

Springer Vieweg | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Postfach 15 46 · 65173 Wiesbaden · Abraham-Lincoln-Straße 46 · 65189 Wiesbaden

Amtsgericht Wiesbaden, HRB 9754, USt-IdNr. DE811148419

Geschäftsführer Dr. Ralf Birkelbach (Vors.), Armin Gross, Albrecht Schirmacher | Director Corporate Publishing, Corporate Content & Ad Sales Armin Gross

Director Marketing & Direct Sales Rolf-Günther Hobbling | Director Production Christian Staral

ISSN 1862-1791

WISSENSCHAFTLICHER
BEIRATProf. Dr. Dr. h.c. Manfred Broy
Fakultät für Informatik,
Technische Universität MünchenDipl.-Inf. Elmar Frickenstein
Leiter Elektrik/Elektronik und
Fahrerarbeitsplatz, BMW GroupDipl.-Inf. Hans-Georg Frischkorn
Leiter Global Automotive,
ESG Elektroniksystem und
Logistik GmbHRicky Hudi
Leiter Entwicklung Elektrik/Elektronik,
Audi AGProf. Dr.-Ing. Rolf Isermann
Institut für Automatisierungs-
technik, Technische Universität
DarmstadtProf. Dr.-Ing. Jürgen Leohold
Leiter der Konzernforschung,
Volkswagen AGWilfried Nietschke
Mitglied der Geschäftsleitung,
Geschäftsbereich Powertrain
Mechatronik, IAV GmbHProf. Dr.-Ing. Konrad Reif
Studiengangsleiter
Fahrzeugelektronik und
Mechatrische Systeme,
Duale HS Baden-WürttembergProf. Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss
Lehrstuhl Kraftfahrzeugmechatronik
am IVK, Universität StuttgartStephan Wolfsried
Leiter Elektrik/Elektronik, Fahrwerk,
Mercedes Car Group Entwicklung,
Daimler AG

HERAUSGEBER

Dr. Johannes Liebl, Wolfgang Siebenpfeiffer

REDAKTION

CHEFREDAKTEUR

Wolfgang Siebenpfeiffer (kommissarisch)
tel +49 611 7878-349 · fax +49 611 7878-462
wolfgang.siebenpfeiffer@springer.com

STELLVERTRETENDER CHEFREDAKTEUR

Markus Schöttle (scho)
tel +49 611 7878-257 · fax +49 611 7878-462
markus.schoettle@springer.com

CHEFIN VOM DIENST

Kirsten Beckmann M. A. (kb)
tel +49 611 7878-343 · fax +49 611 7878-462
kirsten.beckmann@springer.com

RESSORTS

Fahrwerk
Roland Schedel (rs)
tel +49 6128 853-758 · fax +49 6128 853-759
ATZautotechnology@text-com.de**Forschung**
Dipl.-Ing. (FH) Andreas Fuchs (fu)
tel +49 6146 837-056 · fax +49 6146 837-058
fuchs@fachjournalist-fuchs.deMartina Schraad (mas)
tel +49 611 7878-276 · fax +49 611 7878-462
martina.schraad@springer.com**Getriebe**
Dipl.-Ing. Michael Reichenbach (rei)
tel +49 611 7878-341 · fax +49 611 7878-462
michael.reichenbach@springer.com**Karosserie, Sicherheit**
Dipl.-Ing. Ulrich Knorra (kno)
tel +49 611 7878-314 · fax +49 611 7878-462
ulrich.knorra@springer.com**Motor**
Dipl.-Ing. (FH) Richard Backhaus (rb)
tel +49 611 5045-982 · fax +49 611 5045-983
richard.backhaus@rb-communications.de**Produktion, Werkstoffe**
Stefan Schlott (hlo)
tel +49 8726 9675972
redaktion_schlott@gmx.net

STÄNDIGE MITARBEITER

Andreas Burkert (ab), Prof. Dr.-Ing. Stefan
Breuer (sb), Dipl.-Ing. Jürgen Grandel (gl),
Prof. Dr.-Ing. Fred Schäfer (fs)

ONLINE I ELEKTRONISCHE MEDIEN

Redakteurin / Portalmanagerin Automotive
Christiane Brünglinghaus (chb)
tel +49 611 7878-136 · fax +49 611 7878-462
christiane.brueglinghaus@springer.com**Redaktion**
Dipl.-Ing. (FH) Caterina Schröder (cs)
tel +49 611 7878-190 · fax +49 611 7878-462
caterina.schroeder@springer.comKatrin Pudenz M. A. (pu)
tel +49 6172 301-288 · fax +49 6172 301-299
redaktion@kpz-publishing.com

SONDERPROJEKTE

Leitender Redakteur
Markus Bereszewski (mb)
tel +49 611 7878-122 · fax +49 611 7878-462
markus.bereszewski@springer.com

ASSISTENZ

Christiane Imhof
tel +49 611 7878-154 · fax +49 611 7878-462
christiane.imhof@springer.comMarlena Strugala
tel +49 611 7878-180 · fax +49 611 7878-462
marlena.strugala@springer.com

REDAKTIONSANSCHRIFT

Abraham-Lincoln-Straße 46 · 65189 Wiesbaden,
Postfach 1546 · 65173 Wiesbaden
redaktion@ATZonline.de

ANZEIGEN

**STELLV. GESAMTANZEIGENLEITUNG/
LEITUNG KEY ACCOUNT MANAGEMENT**
Tanja PfistererGESAMTVERKAUFSLEITUNG
FACHMEDIEN

Britta Dolch

VERKAUFSLEITUNG

Volker Hesedenz
tel +49 611 7878-269 · fax +49 611 7878-78269
volker.hesedenz@best-ad-media.de

MEDIABERATUNG

Ahmadou Ndiaye
tel +49 611 7878-260 · fax +49 611 7878-78260
ahmadou.ndiaye@best-ad-media.de

KEY ACCOUNT MANAGEMENT

Rouven Bastian
tel +49 611 7878-399 · fax +49 611 7878-78399
rouven.bastian@best-ad-media.de

ANZEIGENDISPOSITION

Susanne Bretschneider
tel +49 611 7878-153 · fax +49 611 7878-78153
susanne.bretschneider@best-ad-media.de

ANZEIGENPREISE

Es gelten die Medieninformationen von Oktober 2011.

MARKETING I SONDERDRUCKE

PRODUKTMANAGEMENT AUTOMEDIEN

Sabrina Brokopp
tel +49 611 7878-192 · fax +49 611 7878-407
sabrina.brokopp@springer.com

SONDERDRUCKE

Martin Leopold
tel +49 2642 907-596 · fax +49 2642 907-597
leopold@medien-kontor.de

PRODUKTION I LAYOUT

Iris Conradi
tel +49 611 7878-263 · fax +49 611 7878-78263
iris.conradi@springer.com

DRUCK UND VERARBEITUNG

Kliemo, Eupen/Belgien. Gedruckt auf säurefreiem
und chlorarm gebleichtem Papier. Printed in Europe.

ABONNEMENTS

Springer Customer Service Center GmbH
Haberstraße 7 · 69126 Heidelberg
tel +49 6221 3454-303 · fax +49 6221 3454-229
Montag bis Freitag, 8 bis 18 Uhr
springervieweg-service@springer.comIHR DIREKTER DRAHT
ZUR ATZelektronik

Redaktion

☎ +49 611 7878-257

Kundenservice

☎ +49 6221 3454-303

Anzeigen

☎ +49 611 7878-260

BEZUGSBEDINGUNGEN

Die Zeitschrift erscheint sechs Mal jährlich zum Jahresabonnementspreis von 99 € für Privatpersonen sowie 149 € für Unternehmen. Studentenvorzugspreis bei Nachweis durch aktuelle Immatrikulationsbescheinigung 59 €. Vorzugspreis für VDI/ÖVK-Mitglieder bei Nachweis durch aktuelle Mitgliedsbescheinigung 79 €. Vorzugspreis für studierende VDI/ÖVK-Mitglieder durch aktuelle Immatrikulations- und Mitgliedsbescheinigung 45 €. Alle Preise gelten zuzüglich Versandkosten (Jahresabonnement: Inland 13 €; Ausland 19 €; AirMail 61 €). Jahresabonnementspreis für Kombination ATZelektronik und ATZelektronik worldwide (eMagazine) 198 €. Alle Preise enthalten 7 % MWST. Jedes Abonnement beinhaltet eine Freischaltung für das ATZonline-Archiv. Der Zugang gilt ausschließlich für den einzelnen Empfänger des Abonnements. Der Bezug des Abonnements kann jederzeit zur nächst erreichbaren Ausgabe schriftlich mit Nennung der Kundennummer abbestellt werden.

HINWEISE FÜR AUTOREN

Alle Manuskripte sind direkt an die Redaktion zu richten. Durch das Einsenden von Fotografien und Zeichnungen stellt der Absender den Verlag von Ansprüchen Dritter frei. Grundsätzlich werden nur solche Arbeiten angenommen, die vorher weder im Inland noch im Ausland veröffentlicht worden sind. Die Manuskripte dürfen auch nicht gleichzeitig anderen Blättern zum Abdruck angeboten werden. Mit der Annahme des Manuskripts erwirbt der Verlag das Recht der honorarfreien Anfertigung von Sonderdrucken. Die Zeitschrift und alle in ihr enthaltenen einzelnen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil dieser Zeitschrift darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages vervielfältigt oder verbreitet werden. Unter dieses Verbot fällt insbesondere die gewerbliche Vervielfältigung per Kopie, die Aufnahme in elektronische Datenbanken und die Vervielfältigung auf CD-ROM und allen anderen elektronischen Datenträgern.