

# ELEKTRIFIZIERT

## Erprobung am E-Maschinen-Prüfstand

Um neue Antriebsstrangkonzeppte von der Auslegung und Simulation in die Realität zu übertragen, ist umfassendes Testing erforderlich. Insbesondere die Erprobung einer elektrischen Maschine und die Interpretation der Ergebnisse stellen dabei eine große Herausforderung dar. Der elektrische Antriebsstrang bietet viele Vorteile, hat aber auch einige sehr spezielle Eigenschaften, die das besondere Augenmerk der Ingenieure erfordert. Prüfstände bei Porsche Engineering ermöglichen komplexe Erprobungen und detaillierte Auswertungen, die für den Entwicklungsprozess von Bedeutung sind.

*Text: Johannes Aehling, Stefan Gatzemann, Dr. Jan-Peter Müller-Kose  
Fotos: Jörg Eberl*

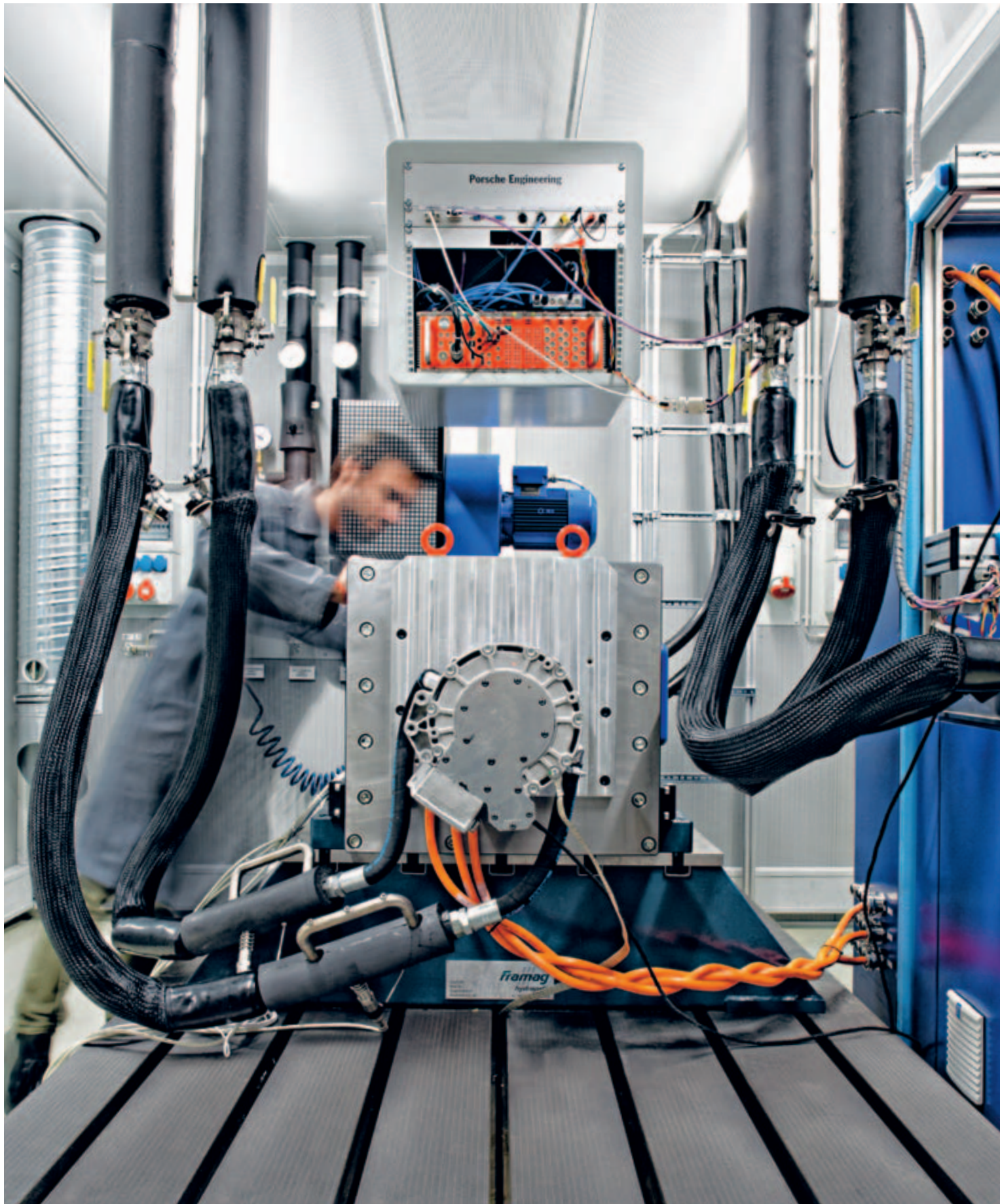
Sind Auslegungs- und Simulationsphasen einer elektrischen Maschine abgeschlossen, wird das Erstmuster gefertigt und am E-Maschinen-Prüfstand auf Herz und Nieren getestet. Im Zuge der Erprobung kommt es zum Abgleich von Theorie und Realität, wofür spezielles Know-how der Ingenieurinnen und Ingenieure notwendig ist. Zudem wird in dieser Phase vor allem sichergestellt, dass die Maschine den Kundenanforderungen entspricht. Die Tests am Prüfstand begleiten die Entwicklung eines elektrischen Antriebs über alle Baumuster hinweg – vom Konzept bis zur Serie. Vor Beginn der Vermessung muss die Maschine jedoch durch den Applikateur zum Leben erweckt werden.

### Applikation

Der Applikateur ermöglicht die Kommunikation beziehungsweise das Zusammenspiel von elektrischer Maschine und Leistungselektronik. Diese beiden Komponenten müssen zunächst aufeinander abgestimmt werden. Hierfür bietet ein Prüfstand zwei mögliche Vorgehensweisen: Die elektrische Maschine kann entweder mit einem Universalumrichter betrieben werden oder es kommt bereits der später im Fahrzeug vorgesehene Umrichter zum Einsatz.

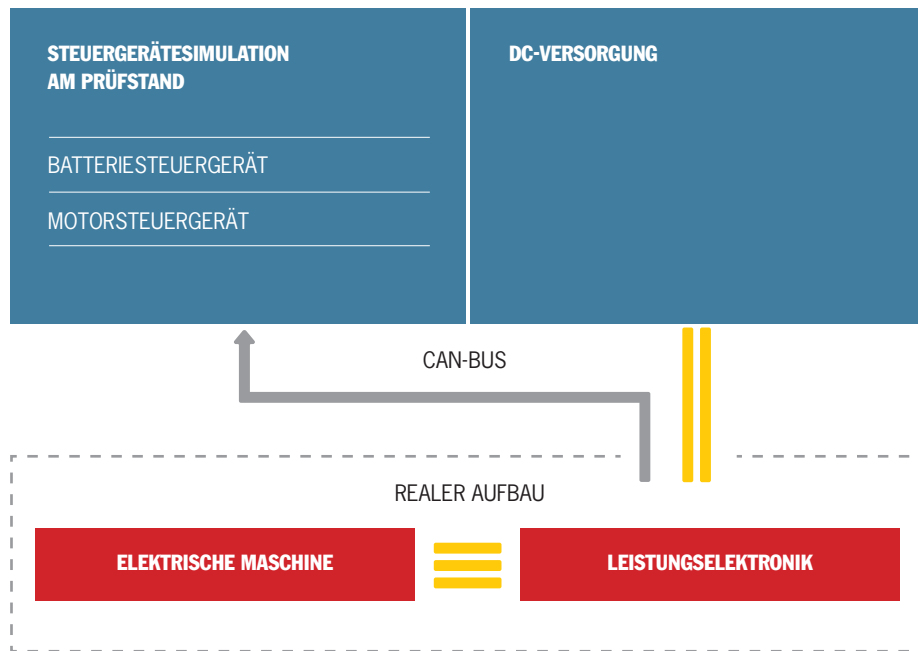
Werden mit dem gleichen Universalumrichter verschiedene Maschinen betrieben, so zeigt der Vergleich der Messrei-

hen die Unterschiede der Maschinenvarianten auf. Diese Leistungselektronik ist oftmals wesentlich leistungsfähiger als die für die Serie geplante Einheit. Sie kann so die Maschine an ihre physikalischen Grenzen bringen und ermöglicht eine genaue Abschätzung von deren Leistungslimits. Im Gegensatz dazu ist es mit einer Leistungselektronik aus dem späteren Antriebsstrang möglich, beide Komponenten direkt im Zusammenspiel zu prüfen. Eine Vergleichbarkeit existiert dann auf der Systemebene Umrichter und elektrische Maschine. Hier werden die Leistungsgrenzen des späteren Antriebs ausgelotet. >



*Die Erprobung am Prüfstand begleitet die Entwicklung eines elektrischen Antriebs über alle Baumuster hinweg – vom Konzept bis zur Serie.*

## PRÜFSTANDSAUFBAU



*Simulation relevanter CAN-Teilnehmer aus dem Fahrzeug am Prüfstand*

Elektrische Maschinen sind im Fahrzeug nicht mit einer Drehmomentmesstechnik ausgerüstet. Somit kann die Leistungselektronik das Drehmoment nicht direkt regeln. Im Wesentlichen stellt die Leistungselektronik einen Strom zur Verfügung und erzeugt damit ein Drehmoment. Über diese Korrelation wird eine Umwandlung von Soll-Drehmoment in einen Soll-Strom und damit von Drehmomentregelung in Stromregelung durchgeführt. Während der Applikation wird die elektrische Maschine an verschiedene Betriebspunkte gefahren. Aus den Messwerten von Leistungselektronik und Prüfstand werden die Parameter zur Applikation der Kennlinien und Kennfelder abgeleitet. Insbesondere die Werte der Drehmomentsensorik, welche nur am Prüfstand existiert, sind hier wichtig, damit eine Strom-Drehmoment-Korrelation ermittelt werden kann.

Neben der reinen Ermittlung der Maschinenparameter gehören weitere Entwicklungsaufgaben zu einer Applikation. So sind die Umrichter in der Regel mit Funktionen ausgestattet, die das System vor Schäden schützen sollen. Darunter fallen zum Beispiel das Einhalten der Stromgrenzen der Hochvolt-(HV-) Batterie oder die Temperaturüberwachung der elektrischen Maschine. Damit diese Funktionen appliziert werden können, müssen währenddessen diverse Vorgaben in der Restbus-Simulation der Systemumgebung geändert werden. Diese provozieren dann eine Reaktion der jeweiligen Schutzfunktionen. Am Beispiel der Stromgrenzen würden die Parameter der Stromabregelung so eingestellt, dass ein Überschreiten des Batteriestroms und damit Schädigungen der Batterie im Fahrzeug verhindert werden.

Im Fahrzeug werden häufig elektrische Maschinen mit Permanentmagneten verwendet. Hier gilt es, die Temperaturabhängigkeit der Magnete besonders zu beachten, da sich über die Temperatur auch der Fluss der Magnete ändert. Der Magnetfluss steht in direktem Zusammenhang mit dem erzeugten Drehmoment, weshalb dieses bei steigender Temperatur sinken würde. Die Entwicklungsingenieure sprechen hier von der sogenannten Flussnachführung. Sie kompensiert die Temperaturabhängigkeit des Drehmoments. Damit die Nachführung appliziert werden kann, ist eine elektrische Maschine mit spezieller Messtechnik (Rotortelemetrie) erforderlich. Die Ausrüstung einer solchen Maschine mit entsprechender Technik ist mit besonderem konstruktiven und finanziellen Aufwand verbunden. Aus diesem Grund muss durch Design Freezes

eine entsprechende Planungssicherheit geschaffen werden.

Dies gilt im Besonderen für die Konstruktion der E-Maschine. Jegliche Änderungen im elektromagnetischen System – in den Materialien oder hinsichtlich der Anbindung des Kühlmantels nach der Applikation der Temperaturabhängigkeiten – können sich negativ auf die Drehmomentgenauigkeit auswirken, was dazu führt, dass über die verschiedenen Baumuster hinweg die Applikation mehrfach nachgezogen und angepasst werden muss.

Nach erfolgreicher Applikation kann mit der eigentlichen Erprobung der elektrischen Maschine begonnen werden.

## Erprobung

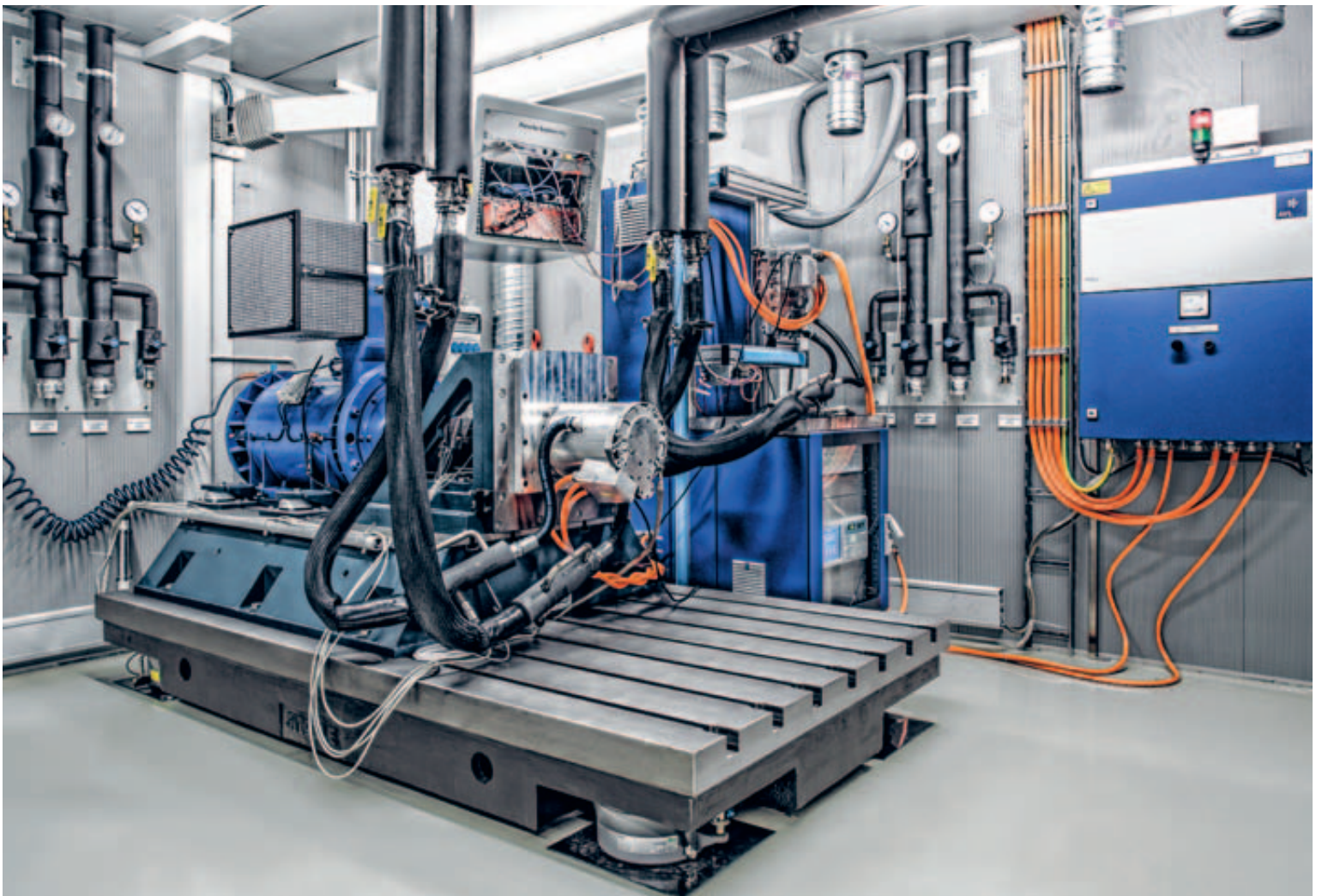
Bei der Erprobung wird zwischen folgenden vier verschiedenen Anforderungskategorien unterschieden:

- 
- > Performance
  - > Betriebsfestigkeit
  - > Missbrauch
  - > Referenzvermessung
- 

In der Performance-Erprobung liegt der Fokus auf den Leistungsdaten der elek-

trischen Maschine. Bei der Validierung der Betriebsfestigkeit wird die elektrische Maschine auf Lebensdauer getestet. Spezielle Prüfzyklen raffen das Lastkollektiv über Lebensdauer thermisch wie mechanisch auf wenige Wochen. Bei Missbrauchsversuchen werden mögliche Fehlerfälle und Fehlerreaktionen überprüft. Die Referenzvermessung dient dem Ermitteln der Streuung in den Leistungsdaten. Hier werden mehrere Maschinen gleichen Typs nacheinander vermessen, um die Streubreite zu dokumentieren.

Damit alle Anforderungen abgeprüft werden können, wird bei Porsche Engineering auf einen eigens erstellten und vielfach bewährten Prüfkatalog >



*Am Prüfstand kann die elektrische Maschine entweder mit einem Universalumrichter oder mit dem später im Fahrzeug vorgesehenen Umrichter betrieben werden.*

## TECHNISCHE DATEN

### DC-Versorgung

Nennleistung	250 kW
max. HV-Spannung	800 V
max. DC-Strom	600 A

### Lastmaschine

Maschinentyp	ASM
Nennleistung	250 kW
max. Drehmoment	600 Nm
max. Drehzahl	15 000 U/min

### Kühlmittel

$T_{\min}$	-40 °C
$T_{\max}$	+140 °C

### Messtechnik

Leistungsmessgerät	WT1800
Drehmomentmessflansch	HBM T12
Porsche-Messtechnik	SMT 5
Steuergerätezugriff	ES593

zurückgegriffen. Dieser beinhaltet mehr als 70 durchzuführende Einzeltests aus der Serienentwicklung, die alle Entwicklungsaspekte abdecken. Zu den wichtigen Standarderprobungen gehört die Prüfung der Wirkungsgradkennfelder. Diese Werte dienen später unter anderem auch den Berechnungsingenieuren zur Ermittlung einer Reichweitenabschätzung des Fahrzeugs. Im Gegensatz zu einer Verbrennungskraftmaschine besitzt eine elektrische Maschine eine sehr große Überlastfähigkeit, die ein Vielfaches der Dauerleistung erreichen kann. Um diesen kurzzeitigen Überlastbereich zu untersuchen, werden verschiedene Maximal-kennlinien ermittelt. Die Definition, welchem zeitlichen Wert der Begriff „kurzzeitig“ entspricht, wird üblicherweise in der Auslegung bereits definiert.

Neben der Bestimmung von Kennwerten und Kennfeldern am Prüfstand sind

auch sogenannte kundenrelevante Prüfzyklen wichtig. Sie bilden das spätere Nutzerverhalten im Fahrzeug ab und sind je nach Markt und Fahrzeugklasse differenziert. Die Komponenten spiegeln in einem kundenrelevanten Zyklus den Betrieb im Gesamtverbund mechanisch und thermisch wider. Von Interesse sind hierbei stabile und reproduzierbare Beschleunigungs- und Fahrkomfortwerte, die mit den Anforderungen aus klassischen Antrieben mithalten müssen.

Neben den Tests im Gesamtverbund oder als Einzelkomponenten wird die Bedeutung einer detaillierten Betrachtung von Subkomponenten im Rahmen der Erprobung oftmals unterschätzt. Porsche Engineering berücksichtigt dies vom ersten Konzept an innerhalb der Performanceerprobungen. Für die erfolgreiche Integration des Antriebs ins

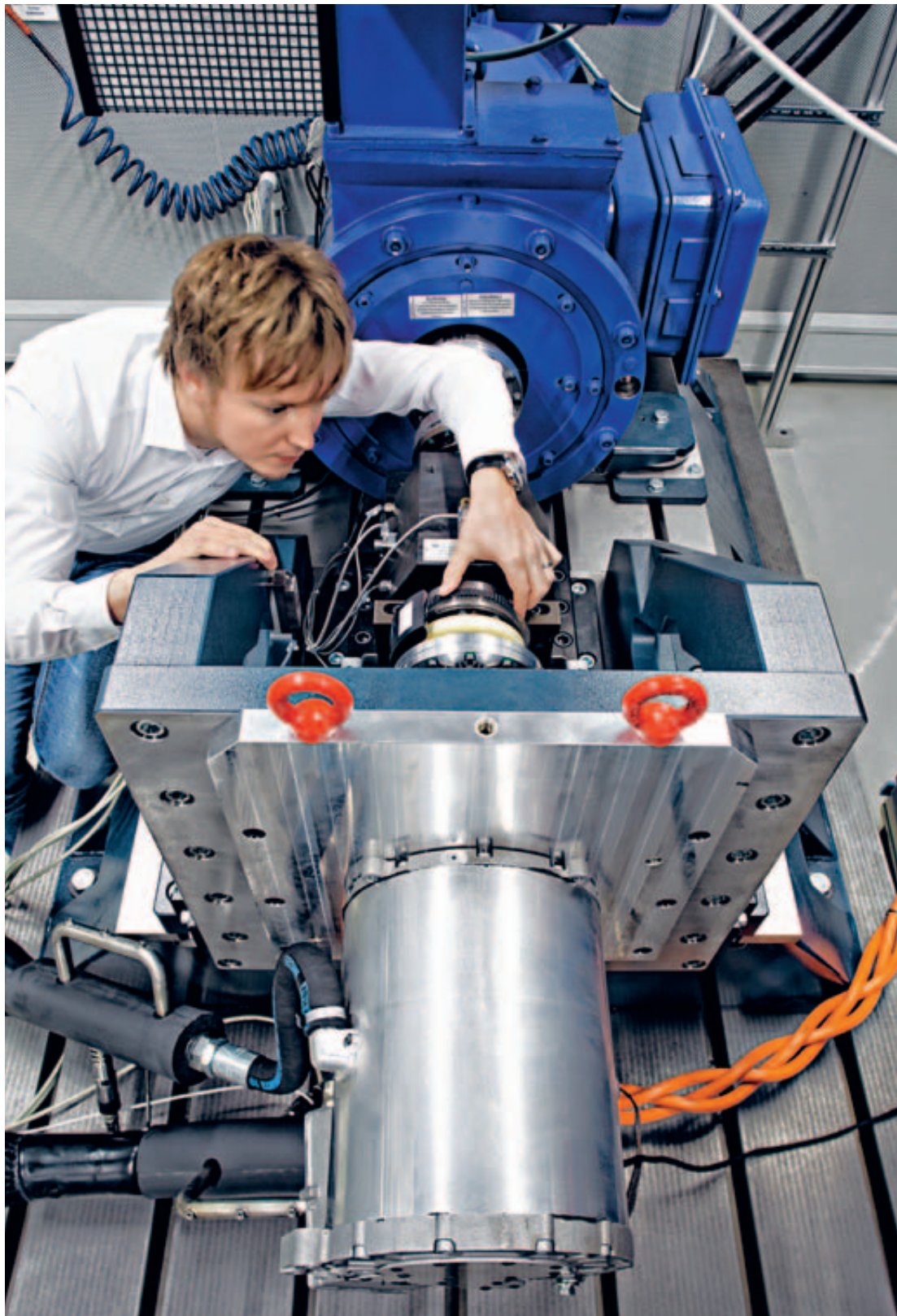
Fahrzeug zählt hierbei jedes Detail. Ein Beispiel sind die vielfältigen Umgebungsbedingungen im Automotive-Bereich. Hier sieht sich der Entwickler zum Beispiel mit Fragen der Materialverträglichkeit konfrontiert, die im Standardumfeld einer elektrischen Maschine normalerweise nicht auftreten. Durch eine frühe Einbeziehung aller Faktoren können jedoch Probleme frühzeitig erkannt oder vermieden werden.

In der Erprobung ist die Vergleichbarkeit und die Reproduzierbarkeit der erzeugten Ergebnisse ein wichtiger Grundsatz. Der Prüfstand von Porsche Engineering ist diesbezüglich gegenüber anderen internen und externen Prüfständen validiert und die Darstellung der Messergebnisse normiert. Der neue E-Maschinen-Prüfstand ergänzt somit auf ideale Weise die umfangreiche Testlandschaft von Porsche.

## Auswertung und Analyse

Noch während der Erprobung werden die Zwischenergebnisse vom Versuchsingenieur kontinuierlich analysiert. Bei Fehlern oder Auffälligkeiten sind oftmals schnelle Sondermessungen erforderlich, um die eigentliche Ursache zu identifizieren. Grundsätzlich gilt: Je früher ein Problem analysiert und je schneller die Ursache identifiziert wird, desto geringer ist die Auswirkung auf das Projekt. Ein Fehler, der erst spät im Projekt entdeckt wird, ist wesentlich kostenintensiver als im frühen Projektstadium. Durch die kontinuierliche Kontrolle der Ergebnisse kann die Wahrscheinlichkeit einer Schädigung des Prüflings minimiert werden.

Jede Einzelkomponente wird bei Porsche Engineering stets aus Gesamtfahrzeugsicht betrachtet. Hierfür stehen Experten aus den verschiedenen Bereichen der Fahrzeugentwicklung zur Verfügung, die im Problemfall auch interdisziplinär schnell konsultiert werden



*Jede Einzelkomponente wird bei Porsche Engineering stets aus Sicht des Gesamtfahrzeugs betrachtet.*

können. Sehr häufig berühren Probleme mehrere Themenfelder, sodass sich ein Gesamtbild erst in der Diskussion mit Experten aus unterschiedlichen Bereichen ergibt.

Zum Abschluss der Erprobung wird ein Bericht inklusive einer ausführlichen Interpretation der Ergebnisse erstellt. Die Interpretation führt zu einer Liste von Maßnahmen, welche der Ingenieur er-

greifen kann, um seine Komponente weiterzuentwickeln und somit den Regelkreis zwischen Auslegung und Erprobung zu schließen. ■