

TEST- UND SIMULATIONSFELD FÜR DEN ELEKTRISCHEN ANTRIEBSSTRANG

Das Test- und Simulationsfeld für den elektrischen Antriebsstrang des Fraunhofer-Instituts für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM) in Bremen schlägt die Brücke vom Feldversuch zur Simulation. Hier wird der elektrische Antriebsstrang mit unter Realbedingungen erfassten Lastprofilen getestet. Es können der gesamte Strang oder einzelne Komponenten geprüft, bewertet und optimiert werden.

AUTOREN



DIPL.-ING. STANISLAV VASIĆ
ist Projektleiter Elektrische Systeme
und Leiter der Arbeitsgruppe
Test- und Simulationsfeld elektri-
scher Antriebsstrang am Fraunhofer-
Institut für Fertigungstechnik und
Angewandte Materialforschung
(IFAM) in Bremen.



ÉTIENNE LEDUC
ist studentischer Mitarbeiter
in der Arbeitsgruppe
Test- und Simulationsfeld
elektrischer Antriebsstrang
am Fraunhofer IFAM in Bremen.



DIPL.-ING. ROLF SPELLMEYER
ist Applikationsingenieur im Bereich
Prüfstandsbaue und Elektromotor-
prüfung bei der imc Messsysteme
GmbH in Berlin.

RANDBEDINGUNGEN

Die Möglichkeiten der modellgestützten Entwicklung im elektromobilen Bereich sind wegen fehlender Betriebs- und Nutzungserfahrung zurzeit noch stark eingeschränkt. Reale Erprobungsdaten von Prototypen und ersten Serienfahrzeugen bringen aber neue Erkenntnisse und ermöglichen die Entwicklung von realitätsnahen Simulationsmodellen. Damit wird es möglich, anspruchsvolle Entwicklungs- und Erprobungsaufgaben von der Straße in die Simulation und auf das Testfeld ins Labor zu verlegen. Dabei wird der Entwicklungs- und Applikationsaufwand aufgrund der starken Diversifizierung der Antriebskonzepte stark steigen.

Dieser Artikel beschreibt im ersten Teil einige typische Aufgaben und Anforderungen an das Testfeld. Im zweiten Teil wird die Entwicklung und die Applikation von physikalischen Energiespeichermodellen thematisiert.

EIGENSCHAFTEN DER EINGESETZTEN SOFTWARE

Der Steuerungs- und Auswertungssoftware kommt eine wichtige Bedeutung zu, da sie ohne tief gehende Programmierkenntnisse eingerichtet werden kann. Plakativ gesagt folgt sie dem Prinzip „Konfigurieren statt Programmieren“, da sie primär von Ingenieuren und nicht von Informatikern genutzt wird. Dabei ist sie so flexibel, dass sie auf verschiedenste Aufgabenstellungen und Hardwarekonfigurationen angepasst werden kann.

Bei der Konfiguration des Test- und Simulationsfelds werden die Parameter für die auszuführende Aufgabe gesetzt und bestehende Lastprofile (wie gemessene Fahrprofile) geladen. Diese werden gegebenenfalls anschließend verändert und die Abfolge der einzelnen Test- und Simulationsschritte festgelegt. Dabei stehen die vier möglichen Betriebsmodi zur Verfügung:

- : Betriebspunkt (Handsteuerung durch manuelle Vorgabe von Betriebspunkten), ❶
- : Fahrzyklus
- : Motorkennlinie
- : Energiespeichersystemprüfung.

Die eingerichteten Versuche, deren Dauer 24 h übersteigen kann, können dann ein- oder mehrfach durchgeführt werden. Die

Versuche lassen sich sowohl im Automatik- wie im Handbetrieb fahren.

Während der Versuche können die Messdaten von bis zu 100 Kanälen plus der anfallenden Steuerungsdaten erfasst und auf einem lokalen Server gespeichert werden.

Bei der Auswertung nach Versuchsende wird auf automatisierte Standardberichte verzichtet, da die Versuchsanforderungen von Mal zu Mal sehr unterschiedlich sind. Dabei bietet die Software zur Dokumentation der Versuche alle Freiräume bei der mathematisch-statistischen Auswertung und Datendarstellung.

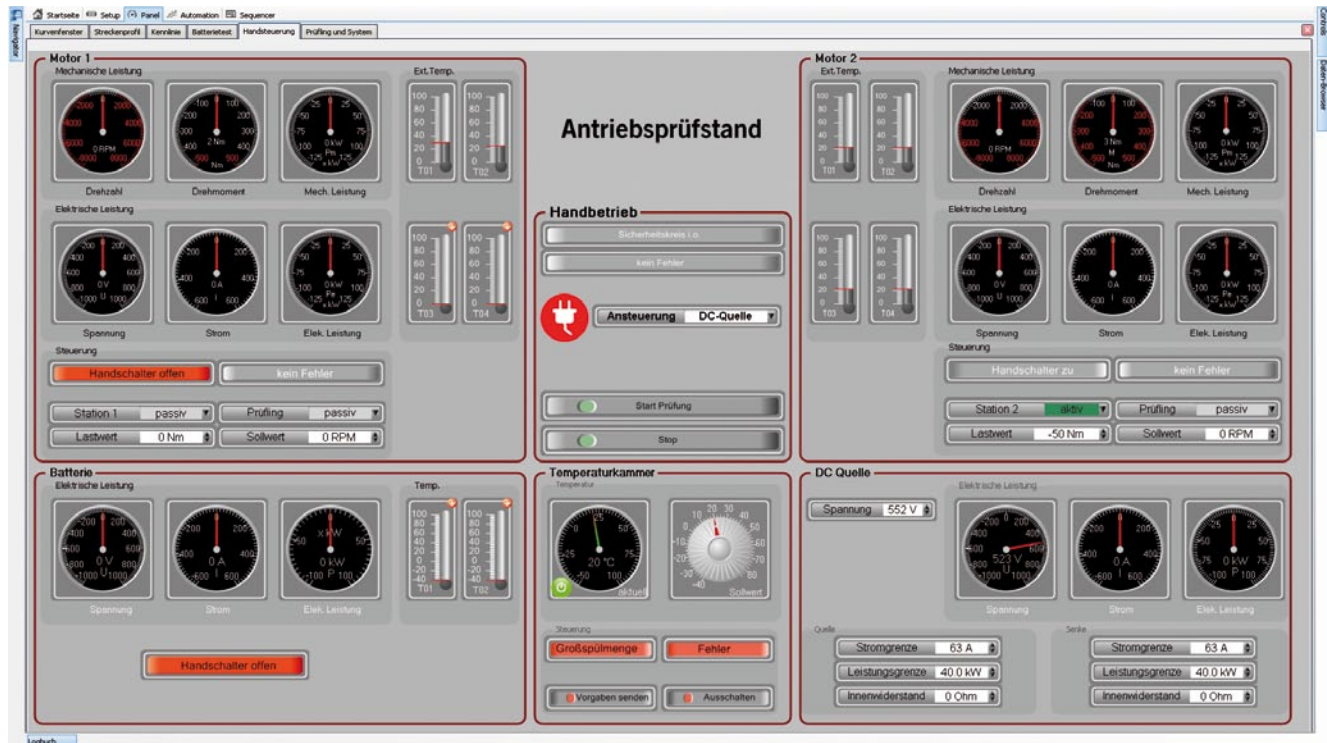
Die erstellten Auswertungen werden dann gemäß der Test- und Simulationsanforderungen in Berichten zusammengefasst. Als Ergebnis kann dann zum Beispiel die Empfehlung stehen, die Versuche unter definierten veränderten Bedingungen fortzusetzen, da das festgelegte Ziel noch nicht erreicht wurde. Oder es werden Optimierungsvorschläge für das getestete System beziehungsweise für die getesteten Komponenten gemacht.

AUFGABEN UND ANFORDERUNGEN, SPEZIELL FÜR DEN E-ANTRIEB

Testfeldversuche sind im Vergleich zu Realversuchen „auf der Straße“ kostengünstiger, schneller durchzuführen und beliebig wiederholbar. Daher ist es das übergeordnete Ziel des Testfelds, reale Fahrbedingungen zu reproduzieren. Ein sich daraus ergebendes Teilziel ist es, Simulationsmodelle von Komponenten – zum Beispiel von Energiespeichersystemen (Batterien und Doppelschichtkondensatoren) – zu entwickeln, zu testen und hinsichtlich des Realverhaltens zu optimieren. Um dabei möglichst wirklichkeitsnahen Bedingungen zu schaffen, werden in realen Fahrversuchen mit Elektrofahrzeugen Lastprofile aufgezeichnet. Diese können dann auf dem Testfeld „nachgefahren“ werden.

Es können sowohl einzelne Komponenten des Antriebsstrangs, mehrere Komponenten oder Gesamtsysteme geprüft werden. Dabei lassen sich üblicherweise die nicht physisch vorhandenen Komponenten simulieren, einschließlich einer (komplexen) Restbussimulation des übrigen Fahrzeugs.

Untersucht und simuliert werden können Energiespeichersysteme, Elektro-



1 Handsteuerung – komplett manuelle Kontrolle

motoren und ihre Umrichter sowie Steuerungsgeräte, zum Beispiel für das Energiemanagementsystem. Die Energiespeichersysteme können unter den verschiedensten Fahrbedingungen geprüft werden, beispielsweise unter Umgebungstemperaturen von -40 bis +140 °C. Elektromotoren können einzeln oder als komplette Antriebsachse, einschließlich Motorensteuerung geprüft werden.

2 zeigt exemplarisch die Konfiguration eines Energiespeichersystemtests. Hier werden die Energiespeicher (im vorliegenden Fall ein Batteriesystem) in definierte Zustände (zum Beispiel Ladezustände) versetzt und unter definierten Umgebungsbedingungen (Temperatur) mit simulierten oder aufgezeichneten realen Lastprofilen belastet.

Vergleicht man ein Testfeld für den elektrischen Antriebsstrang mit einem Testfeld für Verbrennungsmotoren, fallen vier Unterschiede besonders auf:

- : An erster Stelle stehen die Energiespeichersysteme und ihre Modellierung. Wie schon beschrieben, gibt es bisher nur wenige erprobte und realitätsnahe Modelle.

- : Daraus ergibt sich auch die zweite Herausforderung. Um die Modelle korrekt entwickeln zu können, müssen zum Teil sehr kleine Spannungsänderungen (zum Beispiel 0,3 V) bei sehr hohen Potenzialen (beispielsweise 1000 V) gemessen werden.

- : Die beim elektrischen Antriebsstrang auftretenden hohen Spannungen und Ströme (bis 1000 V und 600 A) stellen auch besondere Herausforderungen an die Sicherheit des Bedienpersonals. Durch die hohen Taktfrequenzen der Prüflingsumrichter stellt die EMV hohe Anforderungen an Signalleitungen und Bussysteme.

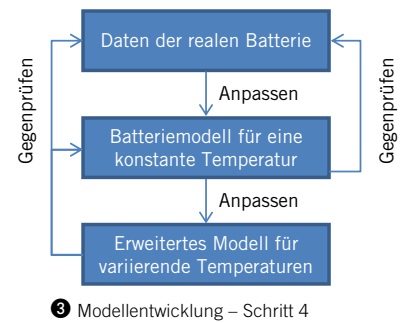
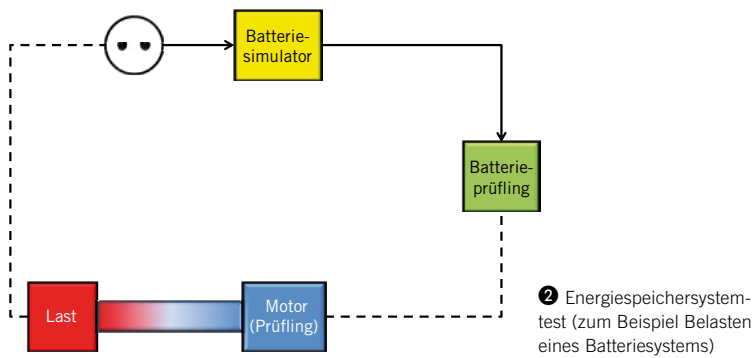
- : Die letzte Besonderheit betrifft die Prüfstandsmotorenregelung. Verbrennungsmotoren werden in einem Quadranten betrieben, das heißt, sie haben eine Drehrichtung und geben Moment ab. Die Lastmaschine des Testfelds fährt in Momentenregelung. Elektromotoren hingegen werden in allen vier Quadranten betrieben, sie können in beiden Drehrichtungen Moment abgeben und aufnehmen (elektrische Bremsenergie zurückspeisen). Die Lastmaschine kann in Momenten- oder Drehzahlregelung gefahren werden.

ENTWICKLUNG VON ENERGIESPEICHERMODELLEN

Hier wird beschrieben, wie neue Modelle zur Simulation von Energiespeichersystemen entwickelt werden können. Dabei ist es gleichgültig, um welche Art von Batterie es sich handelt. Getestet wurde dieses Verfahren zum ersten Mal mit Blei-Säure-Batterien, da diese gegenwärtig in hoher Stückzahl und preiswert verfügbar sind. Mittlerweile hat es sich auch bei Lithium-Ionen-Batterien bewährt.

Im ersten Schritt werden die Batteriechemie und die elektrischen Kennwerte der Batterie ausgewählt, die es zu modellieren gilt. Aus der Batteriechemie ergeben sich zu berücksichtigende Randbedingungen wie die Betriebstemperatur, maximale Ströme sowie strom- und temperaturabhängige Kapazitätscharakteristika.

Im zweiten Schritt wird entschieden, was simuliert werden soll. Beim ersten Einsatz des Verfahrens war dies die Spannungs-Zeit-Kurve in Abhängigkeit von der Temperatur und des gewählten Entladestroms. Dies diente zur Vereinfachung und Verifikation der Anwendbarkeit der Simulationssoftware (Matlab/Simulink). Diese stellt mehrere Modellierungs-



methoden zur Wahl. Wir haben uns für ein physikalisches Modell entschieden, das es die Einzelkomponenten einer Batterie als elektrisches Ersatzschaltbild und damit einen ingenieurmäßigen Ansatz darstellt.

Im dritten Schritt werden echte Energiespeichersysteme getestet, um die für die Modellentwicklung notwendigen Daten zu gewinnen. Im Pilotprojekt wurde dazu die Batterie im Temperaturschrank auf verschiedene Temperaturen gebracht, um dann jeweils mehrere Lade- und Entladezyklen zu durchfahren. Bei der Versuchsplanung ist zu bedenken, dass Batterien Zeit brauchen, um in den verschiedenen Punkten ins thermische elektrische Gleichgewicht zu kommen. Dies kann die Zahl der zu erfassenden Daten, beispielsweise aufgrund vorgegebener Entwicklungszeiten, einschränken.

Im vierten Schritt werden Simulation und Experiment verglichen und das Modell so lange über eine gezielte Parameteroptimierung verändert, bis es der Realität weitestgehend entspricht, ④. Dies geschieht in zwei Phasen. In der ersten Phase wird das Modell für eine konstante Betriebstempera-

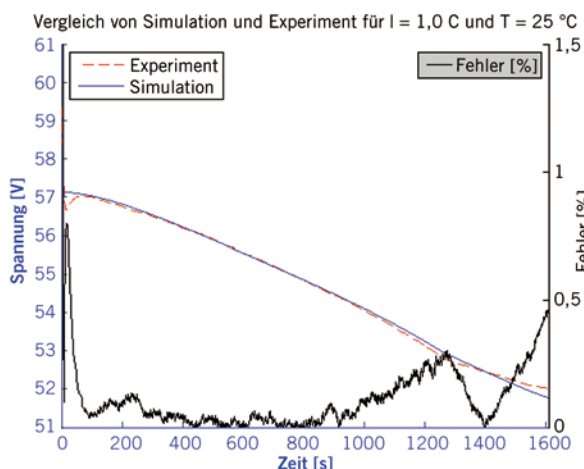
tur entwickelt. Dazu wird Batteriemodell aufgebaut, das zum Beispiel bereits in Matlab/Simulink in einer Allgemeinform vorhanden ist, und die Modellparameter einzeln in großen Bereichen (0- bis zum Teil 1000-faches des üblichen Werts) variiert, um zu ermitteln, welchen Einfluss sie jeweils auf die Kurvenverläufe haben. Aufgrund der Ergebnisse werden die Parameter ausgeschlossen, die einen vernachlässigbaren Einfluss haben. Die anderen Parameter werden durch Versuch und Irrtum solange iterativ angepasst, bis sie die realen Versuchsergebnisse in einer definierten Simulationsgüte (das heißt das Verhältnis aus Simulation zu Realität) widerspiegeln.

In der zweiten Phase wird das für eine Temperatur erstellte Modell erweitert, um auch die weiteren erfassten Messwertverläufe für variierende Temperaturen zu erfassen. Dazu wird das Modell derart angepasst, dass sich die für die erste Temperatur erstellte Kurve nach Möglichkeit nur marginal verändert. Dies ist die Voraussetzung, um eine hohe Simulationsgüte zu erreichen. Hierzu kann es notwendig sein, neue Variablen in die Modellgleichungen

einzuführen, die die Kurvenverläufe in Abhängigkeit von der Temperatur stärker beeinflussen, als es das anfangs ausgewählte Modell vorsieht.

Nach Abschluss des vierten Schritts steht ein optimiertes Batteriemodell zur Verfügung. Es kann über einen bestimmten Temperatur- und Strombereich eingesetzt werden, um bei Echtzeitberechnungen im Feldversuch, im tatsächlichen Einsatz oder im Testfeld die Batterie zu simulieren. ④ zeigt die Ergebnisse für eine Blei-Säure-Batterie mit einem Fehler von $< 1\%$.

Nachdem sämtliche zuvor beschriebenen Schritte durchgeführt wurden, steht ein sich realistisch verhaltendes Modell eines Energiespeichersystems zur Verfügung. Mit ihm können kostengünstig und schnell verschiedene Antriebsstrangtopologien (zum Beispiel verschiedene Motoren in verschiedenen Fahrzeugmodellen) auf ihre Eignung für verschiedene Anwendungsszenarien (beispielsweise Stadt-, Überland- und Autobahnfahrten zu verschiedenen Jahreszeiten) untersucht werden. Zeitveränderliche Prozesse, wie die Zellalterung bei Batterien oder Doppelschichtkondensatoren können ebenfalls modelliert werden. Ein besonderer Vorteil dabei ist jedoch, dass sich das Modell stets in seinen Ausgangszustand versetzen lässt. Irreversible Schädigungen eines realen Energiespeichersystems (zum Beispieldurch Alterung, Zellschädigung), die unter Umständen eine Neuanschaffung eines zu betrachtenden Energiespeichersystems erfordern, sind dabei ausgeschlossen.



④ Vergleich Simulation und Test für eine Blei-Säure-Batterie

DOWNLOAD DES BEITRAGS
www.ATZonline.de

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