

# FVV-Forschungsfokus E-Maschinen

Im Netzwerk der FVV forschen Unternehmen, Institute und Verbände gemeinsam und vorwettbewerblich an Antriebslösungen für Klimaneutralität im Verkehrssektor. Dabei werden alle Konzepte berücksichtigt, die potenziell zur CO<sub>2</sub>-Reduzierung beitragen können – batterieelektrische Lösungen genauso wie die Wasserstoffnutzung in Brennstoffzellen oder thermischen Wandlern sowie andere alternative Energieträger. Die Aktivitäten im Bereich batterieelektrischer Antriebe werden seit Kurzem in der dafür gegründeten Expertengruppe E-Maschinen gebündelt.

## 1 GEMEINSCHAFTSFORSCHUNG FÜR DIE GRÜNE TRANSFORMATION IM VERKEHR

Mit dem „grünen Deal“ möchte die EU den Übergang zu einem weltweit führenden Industriestandort vollziehen, in dem Wertschöpfung in Einklang mit Klimaschutz erfolgen soll. Für die Industrien im globalen Wettbewerb birgt das Ziel der Netto-Null-CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2050 große Herausforderungen, denn oftmals müssen sie bisher erfolgreiche Produktausrichtungen und Geschäftsmodelle neu anpassen. In der EU wurden durch die Verbrennung von Kraftstoffen im Straßenverkehr 2021 rund 740 Millionen t CO<sub>2</sub> ausgestoßen [1] – damit ist der Verkehrssektor für rund ein Fünftel der gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen in der EU verantwortlich. Entsprechend groß ist die Verantwortung, die ihm bei der Emissionsreduzierung zukommt, groß ist allerdings auch die Auswirkung der grünen Transformation auf diesen Wirtschaftsbereich.

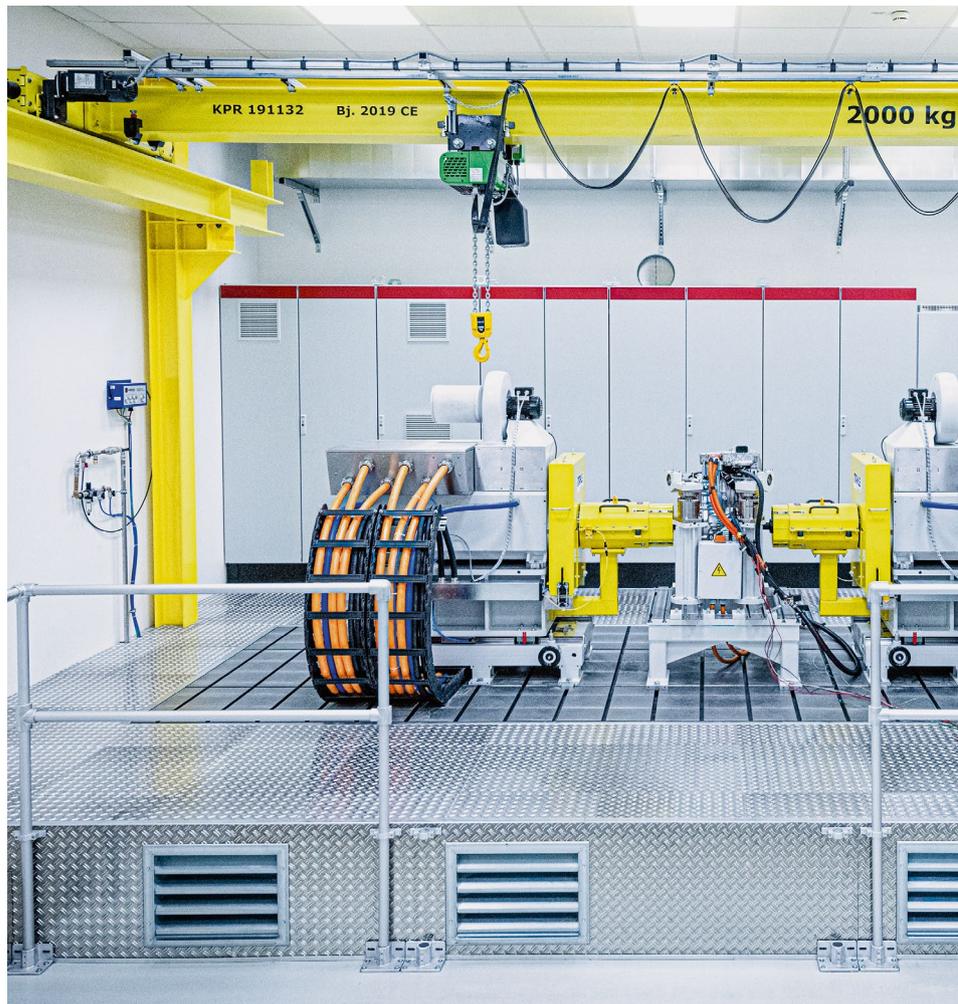
Durch die vorwettbewerbliche Gemeinschaftsforschung der FVV lassen sich Entwicklungen von innovativen Lösungen und Markteinführungen von

Antriebssystemen für die nachhaltige Mobilität deutlich beschleunigen, da sie Synergien im Netzwerk erschließt und dadurch die Effizienz in der Forschung erhöht. Die zunehmende Komplexität erfordert neue Entwicklungsmethoden, die auch kleineren und mittleren Unternehmen zur Verfügung stehen müssen und dadurch zu deren Wettbewerbsfähigkeit beitragen. Innovative Lösungen zur Emissionsreduzierung müssen den wirtschaftlichen Wohlstand nicht schmälern, sie können ihn stützen oder sogar steigern.

## 2 EXPERTENGRUPPE E-MASCHINEN

Das Forschungsprogramm der FVV richtet sich nach faktenorientierten Kriterien wie

der Frage nach einer nachhaltigen und wirtschaftlich tragbaren Energieversorgung für den Bereich der Mobilität oder den Potenzialen neuer auf regenerativen Ressourcen basierenden Energieträgern und Energiewandlern. Dabei wird eine ausgeprägte Diversifizierungsstrategie verfolgt, die alle Konzepte von Antriebstechnologien, Motoren und Turbinen in Kombination mit nachhaltigen Energieträgern berücksichtigt. Der jeweilige Forschungsbedarf wird in Expertengruppen ermittelt, **BILD 1**. Dort werden die entsprechenden Projekte konzipiert, initiiert und begleitet. Die für Energiewandlersysteme zuständigen Expertengruppen und deren Aufgabenstellungen sind in **TABELLE 1** zusammengefasst. Für den Bereich elektrische Antriebe sind die For-





© Mahle

schungsaktivitäten in der vor Kurzem gegründeten Expertengruppe E-Maschinen gebündelt. Im Fokus stehen folgende Themen:

- Verbesserung der elektromotorischen Eigenschaften in mobilen Anwendungen
- elektrische Energiespeichersysteme (Batterien)
- Leistungselektronik des Elektromotors und des elektrischen Energiespeichersystems
- anwendungsorientierte Anpassung der zugehörigen Komponenten und (Teil-)Baugruppen
- Erarbeitung und Verbesserung der zugehörigen Entwicklungswerkzeuge (zum Beispiel zur Simulation) sowie Mess- und Prüfverfahren.

Über die FVV-internen Forschungsaktivitäten hinaus führt die Expertengruppe Kooperationsprojekte im Rahmen des E-Motive-Programms mit der Forschungsvereinigung Antriebstechnik (FVA) und dem Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) durch. E-Motive ist eine arbeitstechnische Koordinierungsschnittstelle für Forschungsthemen, die für beide Forschungsvereinigungen relevant sind. Bei den FVV-Projekten zu Hybridmotoren bringt

## STIMMEN AUS DER FVV



© Carsten Weber

**Carsten Weber ist Leiter der Forschung und Vorentwicklung im Bereich Energy, Propulsion Systems & Sustainability bei der Ford-Werke GmbH.**

„Elektrische Antriebe besitzen schon heute einen hohen, aber dennoch verbesserungsfähigen technischen Reifegrad. Hier stehen der optimierte Einsatz von nachhaltigen Materialien, die Wirtschaftlichkeit sowie die Verbesserung des übergeordneten Gesamtsystems im Vordergrund.“



© Aurobay

**Dr. Alexandra Tokat ist Technical Expert Electromagnetics and Electric Machine Design bei der Aurobay – Powertrain Engineering Sweden AB.**

„Wir arbeiten daran, nachhaltige Mobilitätslösungen zu schaffen, ohne Kompromisse bei der Leistung einzugehen, indem wir konventionelle und neuere Technologien kombinieren. Dabei ist die Forschungskooperation mit der FVV ein wichtiger Baustein.“



© FVV

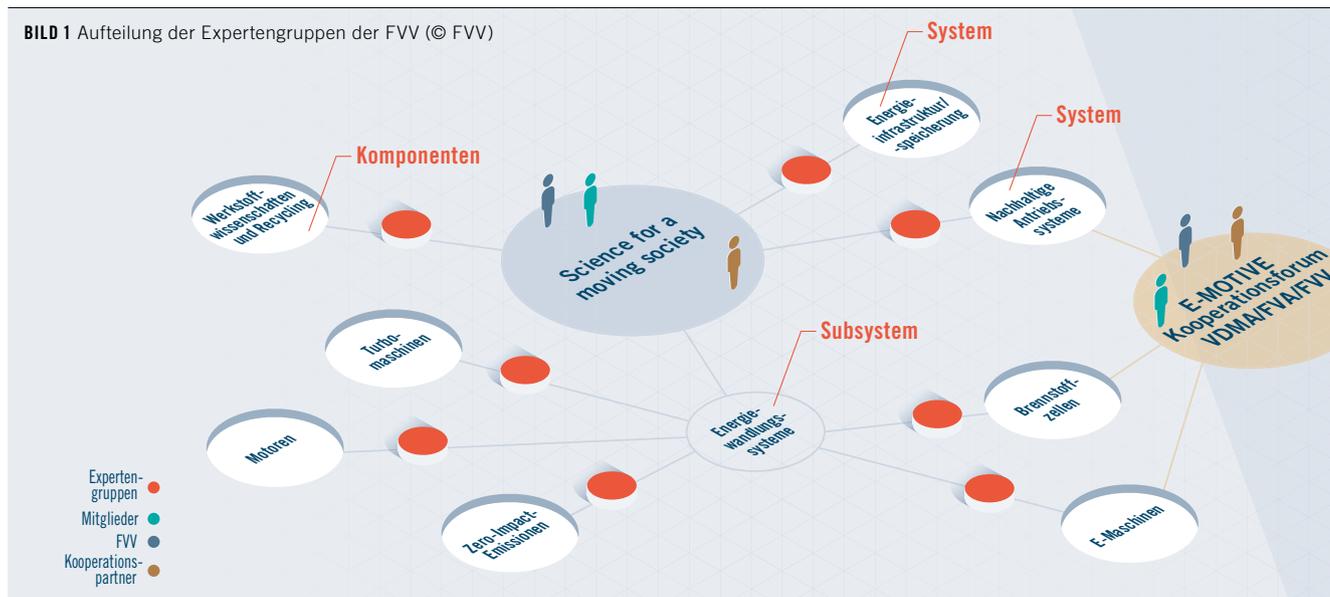
**Martin Nitsche ist stellvertretender Geschäftsführer der FVV e. V.**

„Mit unseren Forschungsaktivitäten erschließen wir Potenziale für eine Wirkungsgradsteigerung und Kostensenkung des E-Antriebs.“



**Science for a  
moving society**

BILD 1 Aufteilung der Expertengruppen der FVV (© FVV)



die FVA zum Beispiel ihre Expertise zu spezifischen Fragestellungen der Batterie-forschung mit ein. Die Mitglieder beider Vereinigungen haben Zugriff auf die Ergebnisse. Damit ist E-Motive eine einzigartige Vernetzungsplattform für Forschungsaktivitäten zu einzelnen Komponenten elektrifizierter Antriebsstränge, die das Know-how der externen Forschungspartner beider Verbände bündelt und die bestehenden Innovations- und Forschungsplattformen zusammenführt. Der Brückenschlag zum VDMA besteht durch seinen Maschinenbaubereich, der auf Automobil-, Produktions- und Recyclingtechnologien fokussiert. Die Schwerpunktthemen der FVA im Rahmen des E-Motive-Programms sind:

- elektrische Traktion (Elektromotor/Getriebe)
- Energiespeicher und Lade-technik in Fahrzeugen
- Systemsteuerung mit Leistungselektronik und Sensorik.

Die FVV-eigenen Forschungsprojekte betreffen vor allem den Antrieb auf Systemebene, also das optimierte Zusammenwirken von Elektromotor, Wechselrichter und Batterie, **BILD 2**. Die Forschungsinhalte orientieren sich an aktuellen Fragestellungen mit Relevanz für die kurz- und langfristige Produktentwicklung. Sie umfassen beispielsweise Wirkungsgradsteigerung, Thermomanagement und Schnellladefähigkeit, aber auch Ressourcenschonung und

Recycling am Ende des Fahrzeuglebenszyklus. Als Beispiele der unter Leitung der Expertengruppe Elektromaschinen derzeit geplanten Forschungsaktivitäten werden im Folgenden drei Projekte vorgestellt.

### 3 HOHE FLEXIBILITÄT UND GERINGERE KOMPLEXITÄT IM ELEKTRISCHEN ANTRIEBSSTRANG

Aufgrund der Fähigkeit der E-Maschine, über einen breiten Drehzahlbereich effizient zu arbeiten, könnten elektrische Antriebe für Traktionsanwendungen im Gegensatz zu ihren Pendanten mit Verbrennungsmotor auf mehrgängige Getriebe verzichten. Der elektrische Antriebsstrang mit einem Einganggetriebe kann die geforderte Höchstgeschwindigkeit und Beschleunigung liefern und gleichzeitig einen relativ hohen Wirkungsgrad für verschiedene Fahrzyklen beibehalten. Diese Konfiguration wird daher häufig für Pkw verwendet, um die Komplexität zu reduzieren und Kosten, Bauraum und Gewicht einzusparen. Da sich jedoch die Belastungsprofile der verschiedenen Fahrzyklen (wie in der Stadt, auf der Autobahn oder auf der Landstraße) erheblich voneinander unterscheiden, bietet ein Fahrzeug mit einem Einganggetriebe nicht für jeden Betriebsbereich den maximalen Wirkungsgrad. Beispielsweise hat eine konventionelle elektrische Traktionsmaschine ein hohes konstantes Drehmoment bei niedrigen Geschwindig-

keiten und einen breiten konstanten Leistungs-/Drehzahlbereich. Das hohe Drehmoment bei niedrigen Geschwindigkeiten wird für einige Steig- oder Schleppevorgänge und für eine schnelle Beschleunigung benötigt. Die üblichen Fahrzyklen erfordern hingegen den Betrieb im Teillastbereich bei mittleren bis hohen Drehzahlen.

Das Forschungsprojekt „Höchste E-Drive-Attribute und Komplexität nach Maß“ soll dabei helfen, geeignete Maßnahmen zu identifizieren, um die Kompromisse zwischen Drehmoment und Betriebsbereich bei zukünftigen Entwicklungen von elektrischen Antriebssystemen besser auszubalancieren. Die Einführung eines breiteren Geschwindigkeitsbereichs wird die Kundenzufriedenheit bei der Nutzung batterieelektrischer Fahrzeuge (Battery Electric Vehicles, BEVs) noch weiter erhöhen und kann die Lücke zu den hochentwickelten Schalt- und Automatikgetrieben von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor schließen. In Anlehnung an deren ausgewiesene Fahrzeugattribute müssen sich die Maßnahmen darauf konzentrieren, dass zum Beispiel die Höchstgeschwindigkeit der E-Maschine angehoben wird oder flexible Getriebeübersetzungen oder Variabilitäten in Bezug auf die Polpaar-/Phasenzahl des Motors und die Steuerlogik einbezogen werden. Dabei soll die Komplexität der Topologie reduziert, die Systemeffizienz verbessert und die Reichweite von BEVs ohne Ände-

Die Dimensionierung der Batterie vergrößert werden. Mit der Ermittlung der am besten geeigneten Dimensionierungsstrategie sollen Ressourcen geschont werden, um zur Nachhaltigkeit in der Herstellung beizutragen. Das Projekt soll auf einen allgemeinen Topologievergleich für die betrachteten Fahrzeuganwendungsfälle mit Darlegung der Optimierungsebenen hinauslaufen. Die Optimierungen müssen spezifizierte Systemziele und Eigenschaften erfüllen und eine Kosten-Nutzen-Analyse der Technologielösungen unterstützen. Hierzu ist das Augenmerk auf bestimmte Rohstoffe zu legen, die volatilen Marktsituationen und Preisbildungen unterliegen.

Detailliertere Untersuchungen mit dem Ziel eines vergrößerten Geschwindigkeitsbereichs sind im Projekt „Traktionsmaschinen mit variablem Pol für BEVs“ geplant. Aufgrund der notwendigen hohen Spreizung durch die unter-

schiedlichen Belastungsprofile haben viele aktuelle elektrische Antriebe eine Maschinenkonstruktion mit hoher Drehmomentdichte, um ein hohes Maximaldrehmoment darzustellen. Für die meisten Antriebszykluslasten sind die Maschinen also eher überdimensioniert. Durch den Einsatz von mehrgängigen Getrieben kann die Größe des Motors bei gleichbleibend hohem Anlaufdrehmoment verringert und sein Wirkungsbereich im Teillastbereich verbessert werden. Um die Implementierung dieser komplexen Getriebe zu umgehen, soll die Integration einer Traktionsmaschine mit variablen Polen untersucht werden. Indem die Anzahl der Pole bei unveränderter Maschinengeometrie durch das Eingangssignal verändert wird, kann der Elektromotor wie ein mechanisches Getriebe arbeiten. Die Motorauslegung und die Umrichterkomplexität einer solchen Lösung sollen beleuchtet und

die Vorteile der Variabilität der Polmaschine analysiert werden. Einen guten Ausgangspunkt für diese Untersuchung liefert die Asynchronmaschine (ASM), da der Rotorfluss durch den Statorstrom induziert wird und daher die Anzahl der Pole des Stators und des Rotors nicht einzeln gesteuert werden müssen.

#### 4 BATTERIEALTERUNG SCHNELL UND GENAU ANALYSIEREN

Kommende EU-Verordnungen schreiben die Rücknahme und Sammlung gebrauchter Antriebsbatterien vor – mit ansteigenden Raten in den Jahren 2027 und 2030. Ziele für die Reparierbarkeit, die Wiederverwendung und das Recycling wurden bereits festgelegt, auch wenn die genauen Zahlen noch angepasst werden müssen. Das macht eine hohe Genauigkeit bei der Erfassung des Gesundheitszustands (State of Health, SoH) der Batterie unumgäng-

Energiewandlungssysteme		Nachhaltige Antriebssysteme	
Innovative beziehungsweise optimierte Energiewandlungssysteme mit minimalen Umwelteffekten und maximaler Prozesseffizienz		Straßen- und Schienenfahrzeuge: klassischer Antrieb mit Verbrennungsmotor, teil-/vollelektrifizierter Antrieb; Triebwerke: Luftfahrzeuge, Schiffe; Arbeitsmaschinen; Stromerzeuger	
► Motoren	► E-Maschinen [Schnittstelle zur E-Motive-Plattform]	► Brennstoffzellen [Schnittstelle zur E-Motive-Plattform]	► Energiespeicherung in der Anwendung ► Systemwirkungsgrad ► Luftverunreinigung, Erderwärmung, Geräusche, Schall, Strahlen ► E-Maschine zusammen mit Batterie
+ Alle konventionellen Themen der Motorenentwicklung	+ Verbesserung der elektromotorischen Eigenschaften in mobilen Anwendungen	+ Alle konventionellen Themen der Brennstoffzellenforschung	+ Fragen der Energiespeicherung in den oben genannten Anwendungen
+ Optimierung und Entwicklung neuer Energiewandlungsprozesse, zum Beispiel mit Schwerpunkt auf Steigerung der Prozesseffizienz künftiger Kraftstoffvarianten (einschließlich Wasserstoff)	+ Elektrische Energiespeichersysteme (Batterie)	+ Luft-/Wasserstoffsystempfad, Medienkonditionierung/-reinigung	+ Systemeffizienz von Energieumwandlungsprozessen (Aufladung, Systemsteuerung/-regelung, Sensortechnologien ...)
+ Verringerung der Umweltbelastungen	+ Leistungselektronik des Elektromotors und des elektrischen Energiespeichersystems	+ Thermomanagement in Brennstoffzellensystemen	+ Thermomanagement
+ Prozessorientierte Anpassung der zugehörigen Komponenten und (Teil-)Baugruppen	+ Anwendungsorientierte Anpassung der zugehörigen Komponenten und (Teil-)Baugruppen	+ Optimierung von brennstoffzellenspezifischen Komponenten und (Unter-)Baugruppen (Ionentauscher, Kompressoren ...)	+ Zero-Impact-Emissionen, Treibhausgasemissionen (zum Beispiel CO <sub>2</sub> ), Lärm, Schall, elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)
+ Auswirkungen der Elektrifizierung auf das Teilsystem „Motor“ und seine Aggregate	+ Erstellung und Verbesserung von Entwicklungswerkzeugen (Simulationswerkzeuge ...) und Mess- und Prüfverfahren	+ Forschung zu Materialien unter brennstoffzellenspezifischen Bedingungen und Belastungen (Materialien für Bipolarplatten, Membranen, Dichtungen ...) in Bezug auf Stackleistung, Lastverhalten, Alterung (Haltbarkeit, Degradation), Befeuchtung ...	+ E-Maschine kombiniert mit Batterie/Verbrennungsmotor [Schnittstelle zur E-Motive-Plattform]
+ Digitalisierung		+ Verbesserung der Stackleistung/Effizienz (Performanceeffekte von Bauteil- und Montagetoleranzen ...)	+ Auswirkungen rechtlicher, sozialer und politischer Anforderungen an zukünftige Antriebssysteme; Kreislaufwirtschaft
+ Erstellung und Verbesserung von Entwicklungs-/Konstruktionswerkzeugen auf Basis sich ändernder Anwendungs-/Teilsystemanforderungen		+ Sicherheitsanforderungen und Definitionen	+ Entwicklung/Konstruktion von Werkzeugen wie zum Beispiel für die Systemarchitektur und die baugruppenübergreifenden Wechselwirkungen
		+ Entwicklung konkreter Bewertungsmethoden in Richtung Industriestandards (generisch, „Best Practice“)	
		+ Technologievergleich Brennstoffzelle mit Protonenaustauschmembran (PEM), Hochtemperatur-PEM, Oxidkeramische Brennstoffzelle (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)	
		+ Erstellung und Verbesserung von brennstoffzellenspezifischen Entwicklungswerkzeugen (Simulationswerkzeuge ...) und Messmethoden (Impedanzanalyse ...)	

TABELLE 1 Forschungsaktivitäten im Bereich Energiewandlungssysteme und nachhaltige Antriebssysteme sowie deren Schnittstellen zur E-Motive-Plattform (© FVV)

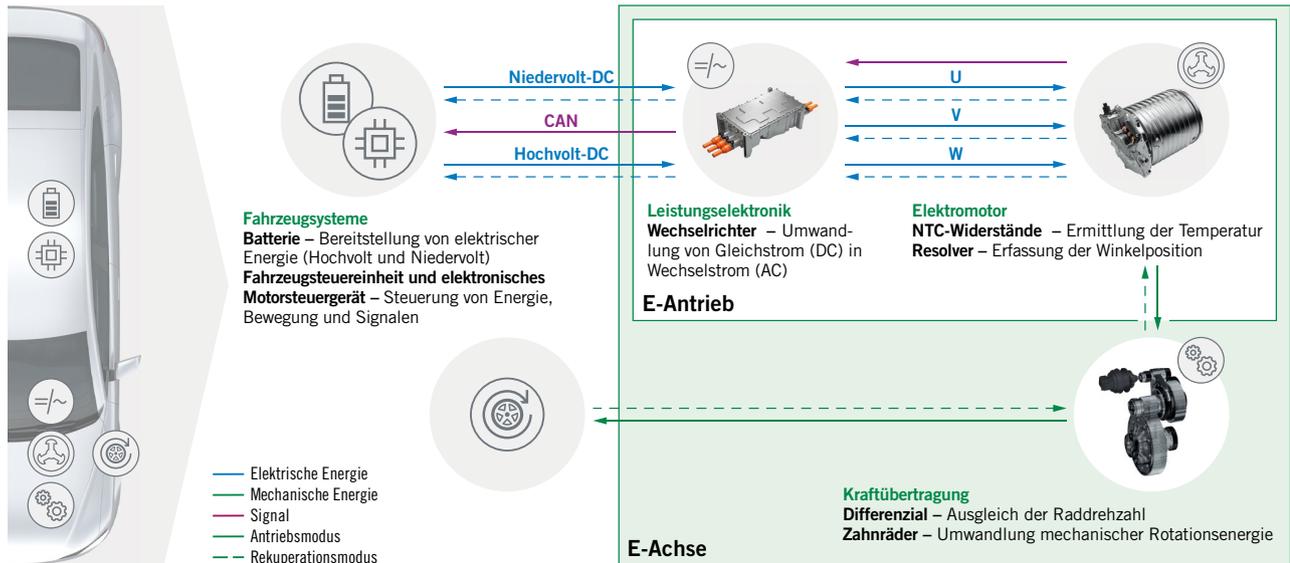


BILD 2 Optimierung der Elektromobilität als Systemansatz (© Bosch Engineering)

lich, um über die weitere Bestimmung der Batterie entscheiden zu können. Neben der Genauigkeit der SoH-Angabe, die bisher als Prozentsatz der Ausgangskapazität angegeben wird, sind die tatsächliche Verlustleistung sowie die ihr zugrunde liegenden Degradationsmechanismen der inneren Komponenten der Batterie von hohem Interesse. Die von der EU geforderte Erfassung von Traktionsbatterien führt dazu, dass die Automobilhersteller künftig hunderte von Batterien pro Tag auf ihren Gesundheitszustand prüfen und schnell über die weitere Bestimmung jeder einzelnen Batterie entscheiden müssen. Aktuelle Informationen über den SoH auf Basis der Daten aus dem Batteriemanagementsystem (BMS) reichen nicht aus, um diese Aufgabe zu erfüllen. Die aktuellen Kapazitäts- und Leistungstests sind zu ungenau und/oder zu zeitaufwendig. Außerdem müssen die derzeitigen Testmethoden von einzelnen Zellen oder Modulen auf ganze Batteriepacks ausgeweitet werden. Daher ist es notwendig, einen Schnelltest zu entwickeln, der zum einen eine deutlich aussagekräftigere SoH-Information bietet, die nicht nur auf dem aktuellen Kapazitätsniveau basiert, und zum anderen ein sehr schnelles Ergebnis ermöglicht, das für die Handhabung großer Mengen geeignet ist.

Um eine schnelle, hochgenaue und zuverlässige Identifikation von Alterungsmechanismen zu etablieren, plant die FVV das Forschungsprojekt „Erkennungsqualität von Traktionsbatterien SoH“, in dem ein Entwicklungswerkzeug kombiniert mit einer statistischen Betrachtung

von Batteriedaten und eine entsprechende Testmethodik erarbeitet werden sollen. Geeignete Testverfahren sind die elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS) und der Stromimpulstest (Current Injection Test, CIT). Sie werden auf ihre erzielbare Genauigkeit hin überprüft. Um die erwartete Menge an Batterien handhaben zu können, muss die methodenbedingte Prüfdauer pro Batterie erheblich verkürzt werden. Die Methode soll mit einer statistischen Analyse der Daten aus dem BMS kombiniert und anhand des Vergleichs neuer Batterien mit speziell gealterten Proben validiert werden. Mit dem entsprechenden Prüfgerät soll der SoH-Wert nicht nur nach Ausbau der Batterie aus dem Fahrzeug ermittelbar sein, sondern möglicherweise bereits im Fahrzeug oder in der Werkstatt im verbauten Zustand.

### 5 DIVERSIFIZIERUNG ZUR BEKÄMPFUNG DES KLIMAWANDELS

Die Aktivitäten der neuen Expertengruppe E-Maschinen reihen sich nahtlos in die Diversifizierungsstrategie der FVV ein, die alle Konzepte zur CO<sub>2</sub>-Einsparung für den europäischen Verkehrssektor berücksichtigt [2]. Die Strategie ist die logische Konsequenz der Ergebnisse einer breit angelegten Studienreihe, in der die FVV die unterschiedlichen Technologien einer Lebenszyklusanalyse unterzogen hat. Eingebunden waren alle an der gesamten Energiekette beteiligten Industrien sowie Forschungseinrichtungen aus Technik und Wirtschaft. Insgesamt haben mehr als 60 Experten aus aller Welt mit-

gewirkt. Dabei wurden die gesamten CO<sub>2</sub>-Wirkketten, das heißt Cradle-to-Grave, berücksichtigt und alle Energieträger und -wandler einbezogen, die aus heutiger Sicht Potenzial zur CO<sub>2</sub>-Reduzierung bieten und die derzeit Gegenstand von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten bei Forschungsanstalten, Ingenieurdienstleistern oder Industrieunternehmen sind. Zusammengefasst kommt die Studienreihe zu folgenden Ergebnissen: Das Potenzial aller Konzepte zur CO<sub>2</sub>-Reduzierung liegt auf einem vergleichbaren Niveau, kein Konzept sticht besonders heraus. Die Schnelligkeit, mit der die Lösungen Marktverbreitung finden, ist existenziell für die Bekämpfung des Klimawandels. Die Diversifizierung macht den Transportsektor robuster – so kann auf die unterschiedlichen Bedürfnisse einer globalen Kundschaft eingegangen werden. Die FVV wird daher weiterhin alle Energieträger und -wandler mit Potenzial zur CO<sub>2</sub>-Reduzierung im Verkehrssektor fördern und ihre Forschung entsprechend breit ausrichten.

#### LITERATURHINWEISE

- [1] Destatis (Hrsg.): Straßenverkehr: EU-weite CO<sub>2</sub>-Emissionen seit 1990 um 21 % gestiegen. Online: [https://www.destatis.de/Europa/DE/Thema/Umwelt-Energie/CO2\\_Strassenverkehr.html](https://www.destatis.de/Europa/DE/Thema/Umwelt-Energie/CO2_Strassenverkehr.html), aufgerufen: 6. Juli 2023
- [2] FVV (Hrsg.): Wie wir die grüne Transformation beschleunigen. Online: <https://www.fvv-net.de/science/wie-wir-die-gruene-transformation-beschleunigen>, aufgerufen: 6. Juli 2023



**READ THE ENGLISH E-MAGAZINE**  
 Test now for 30 days free of charge:  
[www.mtz-worldwide.com](http://www.mtz-worldwide.com)