

#76 SPECTRUM



Rebranding-
Interview
s. 7

Brennstoffzellen –
Eine Antriebslösung für
emissionsfreie mobile
Arbeitsmaschinen s. 13

Entwicklung von Solid-
State-Batterien: Sind
lediglich die Batteriezellen
zu tauschen? s. 39

Softwaredefinierte
Fahrzeuge: Auswirkung
auf F&E Organisationen
und den Produktent-
wicklungsprozess s. 47



Sehr geehrte Leser:innen,

in dieser Ausgabe spricht CEO Stefan Pischinger im Interview mit SPECTRUM über das Rebranding, das FEV vor Kurzem und erstmalig seit seiner Gründung vor 45 Jahren umgesetzt hat. Teil dieses Rebrandings ist das neue Logo. Aber auch das neue Erscheinungsbild des vorliegenden Kundenmagazins geht damit einher. Außerdem geben wir in dieser Ausgabe Einblicke in Effizienzsteigerungen und höhere Praktikabilität von lokal emissionsfreien mobilen Maschinen und Geräten am Beispiel eines Betonglätters. Ein relevantes Thema, da immer mehr Städte Vorgaben ankündigen, nach denen derartige Helfer in den kommenden Jahren keine Emissionen mehr ausstoßen dürfen.

Brennstoffzellen gelten als ein wesentlicher Treiber der Energiewende. Insbesondere Bipolarplatten sind in diesem Zusammenhang eine wichtige Komponente für Verbesserungen in Bezug auf Herstellbarkeit und Haltbarkeit. Wir zeigen auf den folgenden Seiten Lösungen auf, die positive Materialeigenschaften ausnutzen und die Performance und Leistungsdichte weiter verbessern können. In einem weiteren Artikel gehen wir auf Elektrofahrzeuge ein, die permanentmagneterregte elektrische Traktionsmaschinen nutzen. Sie sind auf Rohstoffe wie Seltene Erden angewiesen, die hinsichtlich einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft und ihrer geopolitischen Entwicklung als kritisch angesehen werden. Wir zeigen Möglichkeiten auf, diese Herausforderungen zu lösen.

Eine weitere Entwicklungsaufgabe bei E-Fahrzeugen besteht bei der vom Markt geforderten Reichweite und der entsprechend benötigten Energiedichte in den Batteriezellen. FEV arbeitet an Technologien, die diese benötigten Energiedichten bei gleichzeitiger Erhaltung oder Erhöhung der Sicherheit und Leistungsdichte vorweisen können. Solid-State-Batterien bieten das Potenzial, die für das Ende des Jahrzehnts erwarteten steigenden Reichweiten von batterieelektrischen Fahrzeugen zu realisieren. Wir gewähren Ihnen in einem Artikel einen exklusiven Blick in unsere Arbeit zu dem Thema.

Zudem gehen wir auf die Chance bei softwaredefinierten Fahrzeugen ein, neue Umsatzpotenziale zu erschließen und zeigen wichtige Erfolgsfaktoren auf. Und im Kontext der Euro-7-Gesetzgebung widmet sich diese Ausgabe FEVs ganzheitlichem Ansatz, der den neuen strengeren Anforderungen gerecht wird.

Ich wünsche Ihnen eine interessante Lektüre mit spannenden Eindrücken getreu unserer Philosophie „Feel EVolution“!



Dr. Norbert W. Alt

Chief Operating Officer (COO) und
Geschäftsführer der FEV Group

Z

O

C

H

Z

W

H





Rebranding-Interview mit CEO
Prof. Stefan Pischinger **s. 07**

Brennstoffzellen – Eine Antriebslösung für
emissionsfreie mobile Arbeitsmaschinen **s. 13**

BiFoilStack – Neuartige verbundfolien-
basierte Zell- und Stapeldesigns für
Schwerlastbrennstoffzellensysteme **s. 21**

Thermische Integration von elektrischen
Hochdrehzahlantrieben in elektrischen
Antriebssträngen **s. 31**

Entwicklung von Solid-State-Batterien: Sind
lediglich die Batteriezellen zu tauschen? **s. 39**

Softwaredefinierte Fahrzeuge:
Auswirkung auf F&E Organisationen und
den Produktentwicklungsprozess **s. 47**

FEVs fortschrittliche Hardware-, Steuerungs-,
und Kalibrierlösungen für EURO 7 **s. 55**

FEV Zero CO₂ Mobility
Conference 2022 **s. 63**

FEV und UTAC nehmen erstes
Entwicklungs- und Testzentrum Afrikas
in Marokko in Betrieb **s. 65**





#1

Rebranding-Interview mit CEO Prof. Stefan Pischinger

Stefan, FEV hat seit seiner Gründung das erste Rebranding erfahren. Wie kam es zu diesem Schritt?

Unsere Marke, die seit 1978 unverändert geblieben ist, repräsentiert und begleitet uns auf einer aufregenden, vielfältigen Reise zur Entwicklung von Lösungen. Wir sind der Meinung, dass es an der Zeit ist, dass unsere Markenidentität unser Ziel genauer widerspiegelt – unser Engagement für kontinuierliche Weiterentwicklung. Daher haben wir in den vergangenen Monaten mit einer Vielzahl interner und externer Stakeholder und Experten sowie mit unseren eigenen hoch motivierten und leidenschaftlichen Mitarbeitern zusammengearbeitet. Das Ergebnis: eine neue Corporate Identity für FEV. Eine, die wirklich zeigt, wer wir als Unternehmen sind, wohin wir uns entwickeln und die unsere soziale Verantwortung widerspiegelt.

„Feel Evolution“ ist der neue Unternehmens-claim des Rebrandings – was soll damit ausgedrückt werden?

Die kontinuierliche Weiterentwicklung war und ist für den menschlichen Fortschritt von entscheidender Bedeutung. Seit 45 Jahren verkörpert FEV dieses Prinzip und setzt innovative Ideen in Lösungen um, die in der Branche Maßstäbe setzen. Lösungen, die die Bedürfnisse von heute und morgen erfüllen. Die Evolution steckt in allem, was wir bei FEV tun, sie ist unser Spirit, den man überall um uns herum spüren kann. Sie ist das, was uns antreibt. Ob Gesamtfahrzeugentwicklung, hocheffiziente, nachhaltige Antriebssysteme, Batteriesysteme, automatisiertes Fahren und modernste Softwareentwicklungen oder unsere Lösungen für den Energiesektor – in unseren Kernbereichen Mobilität, Energie und Software hören wir nie auf, uns weiterzuentwickeln. Unser persönlicher, hoher Anspruch an technologische Verbesserungen und ökologische Veränderungen treiben die kontinuierliche Entwicklung unserer Lösungen voran, die der Welt helfen, sich weiterzuentwickeln.

Und während „Feel Evolution“ wiederum den Wandel der Welt von FEV repräsentiert, greift es darüber hinaus die Buchstaben F, E und V auf und gibt ihnen eine neue Bedeutung, mit der wir uns identifizieren können.

Professor Dr.-Ing.
Stefan Pischinger
Präsident und
CEO der FEV Group



»Seit 45 Jahren setzt FEV innovative Ideen in Lösungen um, die in der Branche Maßstäbe setzen und die Bedürfnisse von heute und morgen erfüllen.«

Das Logo hat einen wesentlichen Einfluss auf das Image eines Unternehmens – was zeichnet das neue Logo aus?

Völlig richtig, das neue Logo spiegelt wider, wofür FEV heute steht und soll menschlicher wirken. Angefangen beim „F“, sieht man, dass wir eine abgerundete Ecke eingeführt haben. Das erinnert uns an intelligente Technologie, die für Menschen gemacht ist. Man denke an ein Smartphone, einen Sprachassistenten, eine Technologie, die für Menschen gemacht ist und eine angenehme Haptik aufweist. Das gedrehte „e“ steht für unsere Kreativität und unseren Innovationsgeist. Die Aufwärtsbewegung verleiht ihm eine positive Ausstrahlung. Wir animieren es auch, um Vorwärtsbewegung und kontinuierlichen Fortschritt darzustellen. Das „V“ dagegen ist scharf und steht für Vertrauen und Zuverlässigkeit.

Ist der Rebrandingprozess bereits abgeschlossen?

Die Markteinführung im Oktober 2022 war erst der Anfang. Da wir an mehr als 40 Standorten weltweit vertreten sind, liegt noch viel Arbeit vor uns, die einige Zeit in Anspruch nimmt. Mit Blick auf ein nachhaltiges Vorgehen haben wir beschlossen, die Markeneinführung in den kommenden Monaten schrittweise voranzutreiben.

Wie wirkt sich diese Entscheidung konkret auf Nachhaltigkeit aus?

Wir haben uns bewusst dazu entschieden, unsere neue Marke in den kommenden Monaten mit Bedacht einzuführen. Damit stellen wir sicher, dass wir die vorhandenen Materialbestände ressourcenschonend abbauen und nicht vor Ablauf ihrer Lebensdauer ersetzen müssen.



**FEV**

Was bedeutet das Rebranding für FEVs Kunden, was wird sich für sie ändern?

Der gesamte Rebranding-Prozess ist mehr als eine aktualisierte Markenidentität. Es ist eine Verpflichtung gegenüber unseren Kunden, Nachhaltigkeit und mehr Lebensqualität für alle durch Innovation zu fördern. Unsere Arbeitsqualität wird also auf dem gleichen hohen Niveau bleiben, das unsere Kunden an FEV schätzen. Die Bereiche, in denen wir unseren Kunden erstklassige Lösungen anbieten, werden jedoch kontinuierlich erweitert.

Vielen Dank für diese spannenden Einblicke!

feel evolution

**We drive
innovation
to help
the world
evolve.**

#2

Brennstoffzellen –

Eine Antriebslösung für
emissionsfreie mobile
Arbeitsmaschinen



Der derzeitige Trend zu emissionsfreien Fahrzeugen hat auch im Bereich der mobilen Maschinen und Geräte (non-road mobile machinery - NRMM) Einzug gehalten. Traditionell sind mobile Maschinen und Geräte mit einem Dieselantrieb ausgestattet. Der aktuelle Trend führt zu strengeren Emissionsnormen auch für mobile Maschinen und Geräte. In den ersten Städten, z. B. in Oslo oder Los Angeles, müssen die mobilen Maschinen und Geräte ab 2030 zu 100 Prozent emissionsfrei sein.

In diesem Artikel wird ein Betonglätter von Husqvarna (Abbildung 1) betrachtet. Der Glätter ist für die Verarbeitung von Betonflächen von 2.000–4.500 m² ausgelegt.

Der Prozess der Nachbearbeitung von Beton mit einem Glätter hängt vom Aushärtungszustand des Betons ab. Der Nachbearbeitungsprozess kann in zwei Schritte unterteilt werden: Das Schwenken mit Scheiben in einer frühen Aushärtungsphase und das Glätten mit Flügeln in einer späteren Aushärtungsphase. Jeder Schritt besteht normalerweise aus zwei oder drei vollständigen Durchgängen über die gesamte Fläche. Zwischen den einzelnen Arbeitsgängen muss der Bediener warten, bevor er zum nächsten Schritt übergehen kann. Die Wartezeit hängt von mehreren Variablen ab, z. B. Umgebungstemperatur, Windgeschwindigkeit, der Konstruktion der Bodenplatte usw. Ein Durchgang kann je nach Größe und Aushärtungszustand des Betons zwischen fünf und 25 Minuten dauern, die Wartezeit kann zwischen fünf Minuten und mehr als einer Stunde betragen.

Für die Betonverarbeitung gibt es nur ein kleines Zeitfenster. Wenn dieses gekommen ist, muss die Maschine arbeitsbereit sein und einen kompletten Arbeitsgang ausführen können. Das Timing ist so wichtig, dass auf den meisten Baustellen eine Ersatzmaschine bereitsteht. Die Anforderungen an Betriebs- und Betankungsdauer bewegen sich dabei in einem engen Anforderungsbereich. Die Maschine muss mindestens 45 Minuten am Stück betrieben werden können, das Auftanken darf maximal vier Stunden in Anspruch nehmen. Im Schichtbetrieb, bei dem die Geräte bis zu zwölf Stunden pro Tag im Einsatz sind, kann die tatsächliche Tankdauer jedoch deutlich kürzer ausfallen. Das Betriebstemperaturfenster beträgt -10 bis 50 °C.

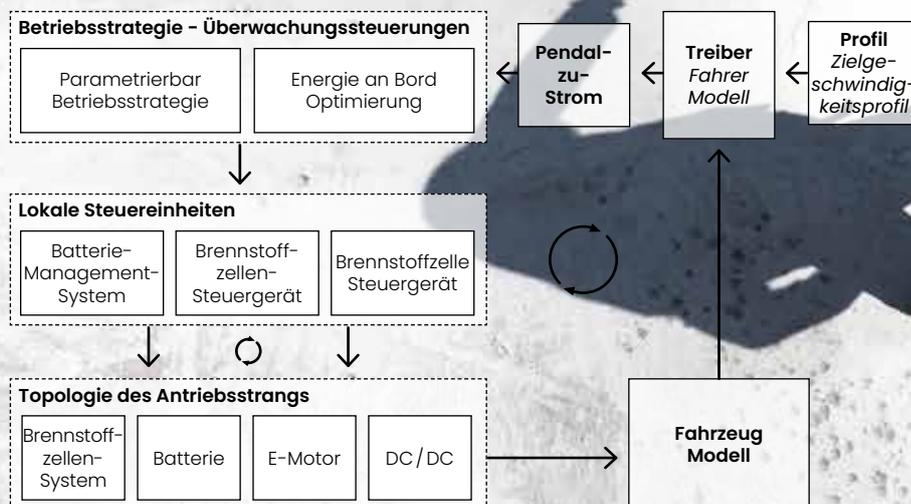
1.
Husqvarna
CRT60X



Vergleich batterieelektrischer vs. brennstoffzellenelektrischer Antrieb

Um die erforderliche Brennstoffzellenleistung, Batteriekapazität und Wasserstoffspeicherkapazität zu bestimmen, wurde ein 0D-Modell des Antriebssystems innerhalb einer FEV Simulationsumgebung für Antriebsstränge erstellt (Abbildung 2). Für den Anwendungsfall und die Zyklussimulation wurden gemessene Lastprofile von kundeneigenen Maschinen verwendet. Basierend auf der durchschnittlichen Antriebsleistung während dieser Zyklen wurde ein Brennstoffzellensystem mit einer Systemleistung von 50 kW ausgewählt. Die Hauptaufgabe der Batterie ist die Deckung des Spitzenleistungsbedarfs bei einem definierten maximalen Ladezustandsabfall (SoC) von 30 Prozent. Voruntersuchungen auf Basis der gegebenen Anforderungen an die Batterie ergaben, dass der limitierende Faktor der Batterie die Leistung und nicht der Energieinhalt ist.

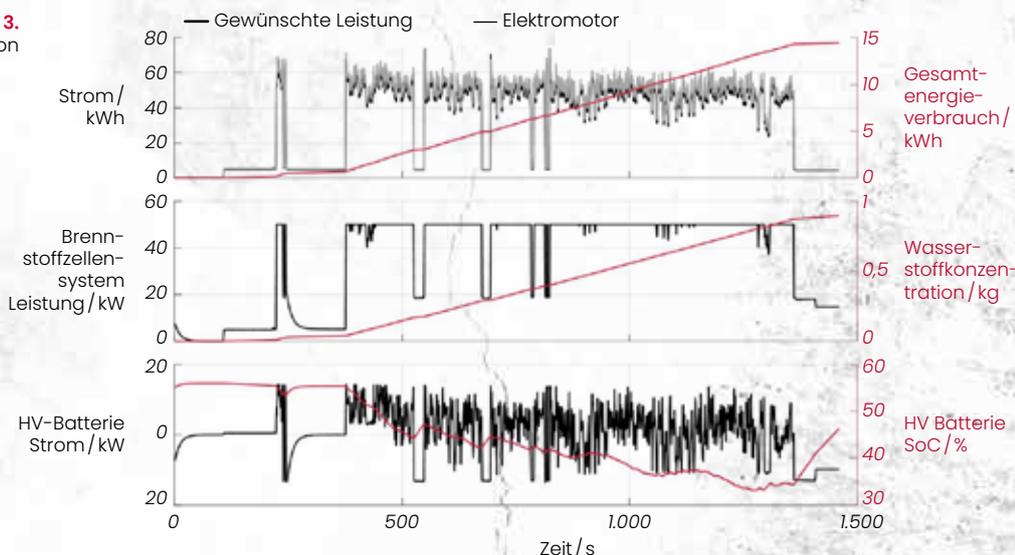
Daher wurde eine NMC-Batterie mit einem nominalen Energieinhalt von 2,58 kWh gewählt. Diese Batterie hat eine Spitzenleistung von 15 kW und ermöglicht eine Dauerleistung von 10 kW. Mit der angewandten Hybridstrategie wird versucht, den Ladezustand der Batterie kontinuierlich bei etwa 55 Prozent zu halten.



2. Modulare Simulationsumgebung für verschiedene Antriebssysteme

Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse für einen typischen Zyklus im Schwenkbetrieb. Die Simulation zeigt, dass die Dimensionierung des Antriebsstrangs die vorgegebenen Anforderungen erfüllt. Der Gesamtenergieverbrauch beträgt 14,4 kWh oder 0,9 kg Wasserstoff in ca. 24 Minuten Betriebszeit. Geht man von einer geforderten Nutzungsdauer ohne Nachtanken/Nachladen von 60 Minuten aus, werden 36 kWh nutzbare Batteriekapazität oder 2,3 kg Wasserstoff benötigt.

3.
Zyklussimulation



Basierend auf einer angenommenen Entladetiefe (DoD) von 60 Prozent, einer Ladeeffizienz von 90 Prozent und einer Leistungsdichte von 140 Wh/kg und 200 Wh/l können die erforderliche Batteriekapazität und das daraus resultierende Gewicht und Volumen berechnet werden. Die Ergebnisse, die von einem SoC-Betriebsfenster von 80 bis 20 Prozent ausgehen, sind in Abbildung 4 dargestellt.

Betriebsdauer	45 Minuten	60 Minuten
Batteriekapazität	45 kWh	60 kWh
Gewicht der Batterie	321 kg	429 kg
Batterie-Volumen	225 l	301 l
Ladedauer (22 kW Ladeleistung)	82 Minuten	109 Minuten
Ladedauer (50 kW Ladeleistung)	36 Minuten	48 Minuten

4.
Batterie-eigenschaften

Bei einer erwarteten Batterielebensdauer von 5.000 Stunden ergibt sich ein Energiedurchsatz von 180 MWh und 4.000 vollständige Zyklen für die 45-kWh-Version bzw. 3.000 vollständige Zyklen für die 60-kWh-Version.

Das Gewicht der resultierenden Batterie, wie in Abbildung 4 dargestellt ist, beträgt ca. 35 Prozent des aktuellen Betriebsgewichts der Arbeitsmaschine. Abbildung 5 zeigt einen Vergleich der Gewichtsauswirkungen des Ersatzes des Dieselmotors durch eine Brennstoffzelle oder eine Batterie. Bei der Brennstoffzelle ist zu beachten, dass das Beispielsystem bereits einen galvanisch getrennten Boost-DC/DC und ein sehr robustes IP-zertifiziertes Gehäuse enthält. Ein Potenzial zur Gewichtsreduzierung kann erwartet werden.



	Batterie		Brennstoffzelle	
Entfernter Dieselmotor	-267 kg	-155 l	-267 kg	-155 l
Ladeluftkühler entfernt	-5 kg	-40 l	-5 kg	-40 l
Entfernter Dieseltank	-53 kg	-55 l	-53 kg	-55 l
H ₂ -Tank			+55 kg	+110 l
Brennstoffzelle			+230 kg	+230 l
Batterie	+429 kg	+301 l	+25 kg	+20 l
DC/DC	+25 kg	+15 l	+25 kg	+15 l
Elektromotor & Inverter	+80 kg	+39 l	+80 kg	+39 l
Zusätzliches Gewicht	+209 kg		+90 kg	
Zusätzliches Volumen		105 l		164 l

5. Gewichtsvergleich Batterie vs. Brennstoffzellen-Elektroantrieb

Bei dem Betonglätter korreliert die erforderliche Leistung linear mit dem Maschinengewicht, da das gesamte Gewicht von den rotierenden Rotoren getragen wird. Das zusätzliche Gewicht von 90 kg im Falle einer Brennstoffzelle erhöht die durchschnittliche Leistung um 3 kW (185 g H₂ pro Stunde). Bei einer batteriebetriebenen Maschine erhöht sich die durchschnittliche Leistung aufgrund des zusätzlichen Gewichts von 209 kg um 6 kW. Um dies zu kompensieren, müssen die Tank- und Batteriekapazität erhöht werden. Bei der batterieelektrischen Version ergibt sich daraus ein zusätzliches Gewicht von ca. 43 kg und ein zusätzliches Volumen von 30 l. Bei den H₂-Tanks ist das zusätzliche Gewicht vernachlässigbar, das zusätzliche Volumen beträgt 8 l (reines H₂-Volumen bei 350 bar). In Anbetracht dessen sowie der erforderlichen Ladedauer von mindestens 48 Minuten bei 50 kW Ladeleistung scheint ein Brennstoffzellenantrieb die geeignetere Lösung für diese Anwendung zu sein.

Technische Machbarkeit und Integrationskonzept

Für die Konzeptstudie wurde ein 350-bar-Zylinder mit einem Durchmesser von 399 mm und einer Kapazität von 1,8 kg gewählt. Die Kapazität reicht für mehr als 45 Minuten Betrieb. Bei Bedarf kann ein zweiter Tank mit 1,8 oder 0,8 kg über dem ersten Tank platziert werden, um die Betriebsdauer auf 70 oder 96 Minuten zu erhöhen.

Positionierung und Einfluss des Brennstoffzellensystems auf den Schwerpunkt

Für diese Studie wurden sechs verschiedene Brennstoffzellentypen oder -konfigurationen von fünf Herstellern betrachtet. In dieser Anwendung muss der Schwerpunkt (COG) berücksichtigt werden. Abbildung 6 zeigt den Einfluss beispielhafter Brennstoffzellensystempositionen auf das initiale COG (COG_i). Zum Vergleich: Ein nach vorne gebeugter Bedie-



6.
Einfluss der
Position des
Brennstoffzellen-
systems auf COG

Option	A	B	C
Position des Brennstoffzellensystems	Vertikal hinter dem Sitz	Horizontal unter dem Sitz	Senkrecht unter dem Sitz
Abstand zu COG1	-526 mm	-226 mm	104 mm
ΔCOG	-98 mm	-42 mm	19 mm

ner verschiebt den Schwerpunkt um ca. 13 mm nach vorne. Je nach Positionierung können 20 bis 40 mm durch geschickte Anordnung anderer Komponenten wie der Hydraulikpumpe und des Elektromotors ausgeglichen werden. Die restlichen 58 mm (bei Position A) müssen durch ein Gegengewicht von 140 kg im vorderen Bereich der Maschine ausgeglichen werden.

Um zusätzliche Gegengewichte zu vermeiden, wird die Brennstoffzelle unterhalb des Sitzes im vorderen Bereich positioniert (Option C). Dies schließt vier der sechs Brennstoffzellensysteme aus, da sie nicht zwischen den Haupt- noch den oberen Rahmen der Maschine passen. Das gewählte Brennstoffzellensystem erfüllt die standardisierten Bauraumanforderungen aus dem EU Projekt StaSHH.



»Mobile Arbeitsmaschinen der Zukunft müssen ganzheitlich mit der Baustelle der Zukunft gedacht werden.«

Ausgewähltes Konzept

Durch eine geschickte Anordnung der Komponenten kommt es zu keiner Verschiebung des COG und somit ist auch kein Gegengewicht notwendig. Abbildung 7 zeigt einen Querschnitt des ausgewählten Konzepts. Das Brennstoffzellensystem ist vertikal im vorderen Bereich unterhalb des Sitzes positioniert. Sein Schwerpunkt ist links vom Maschinenschwerpunkt und kompensiert die Schwerpunktverschiebung des Elektromotors und der Hydraulikpumpe. Batterie und PDU können über dem Elektromotor zwischen FCS und Tank positioniert werden.

Die Brennstoffzelle arbeitet bei einer maximalen Temperatur von 70 °C und benötigt eine Kühlmittelintrittstemperatur von max. 60 °C. Unter Berücksichtigung einer Umgebungstemperatur von bis zu 50 °C ist eine beachtliche Kühlergröße erforderlich. Um ausreichend Bauraum für den Kühler zu gewinnen, wird ein Betriebsmitteltank an die Position des nicht mehr erforderlichen Kraftstofftanks versetzt.

Der Kühler kann dann auf der linken Seite des Fahrersitzes platziert werden. Der Kühler für den Hydraulikkreislauf kann in seiner ursprünglichen Position rechts vom Bediener belassen werden. Die Größe des abgebildeten Kühlers beträgt 650 x 600 mm. Simulationen eines Zulieferers zeigen eine Kühlleistung von ca. 50 kW bei 45 °C Umgebungstemperatur mit einem Standardventilator. Um auch bei 50 °C eine ausreichende Kühlleistung zu gewährleisten, ist eine Optimierung des Kühlerlüfters erforderlich. Abbildung 8 zeigt die Positionierung des Kühlers.

TEXT

Dr. Markus Jesser
jesser@fev.com

Dr. Marius Walters
walters@fev.com

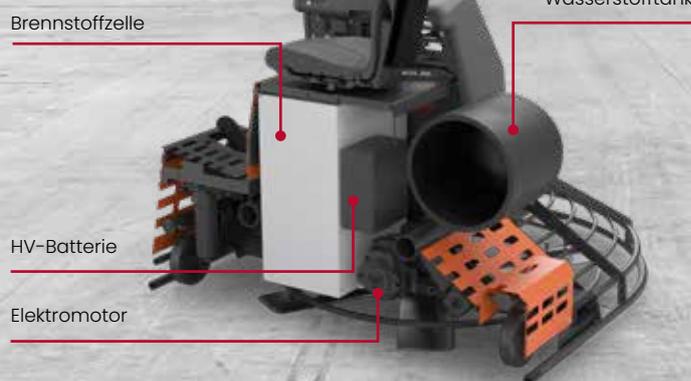
Dr. Anders Johansson
johansson@fev.com

Simon Mertes
mertes_s@tme.rwth-aachen.de

Besonderer Dank gilt

Tobias Gustafson
tobias.gustafsson@husqvarnagroup.com

Mats Lawenius
mats.lawenius@husqvarnagroup.com



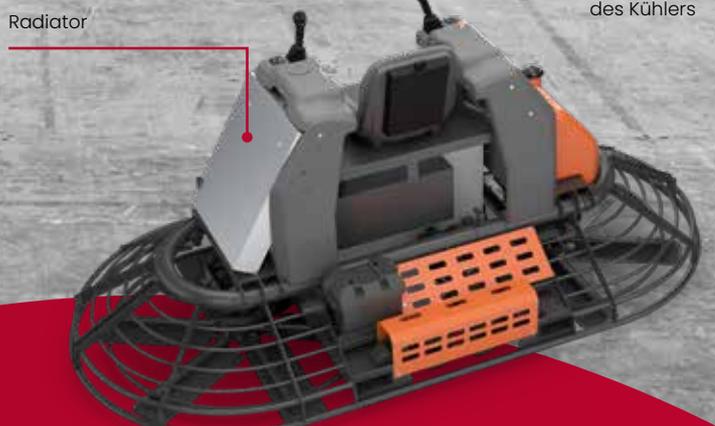
Brennstoffzelle

Wasserstofftank

HV-Batterie

Elektromotor

7. Schnittansicht des gewählten Brennstoffzellenantriebskonzepts



Radiator

8. Positionierung des Kühlers

Die Elektrifizierung bietet bereits im ersten Schritt eine Effizienzsteigerung, da das Hydrauliksystem von der Hybridbatterie angetrieben werden kann und Leerlaufphasen des Dieselmotors während des Handlings vor und nach der eigentlichen Nutzung reduziert werden oder gänzlich entfallen können. In einem nächsten Schritt ist es sinnvoll, die Rotoren elektrisch, statt hydraulisch anzutreiben. Daraus ergeben sich Vorteile in Bezug auf Gewicht und Bauraum, vor allem aber auch ein Effizienzvorteil im Betrieb.

Die Elektrifizierung von Arbeitsmaschinen wird in den kommenden Jahren unerlässlich sein, um einen lokal emissionsfreien Betrieb zu ermöglichen. Auf Baustellen mit eingeschränkter Netzanschlussleistung wird künftig eine lokale emissionsfreie Stromerzeugung notwendig werden. Eine Lösung könnte ein Trailer mit Wasserstofftank und Brennstoffzelle sein, um Strom für die wachsende Anzahl batterieelektrischer Arbeitsmaschinen bereitzustellen und größere Maschinen vor Ort mit Wasserstoff betanken zu können. Mobile Arbeitsmaschinen der Zukunft müssen ganzheitlich mit der Baustelle der Zukunft gedacht werden.

Fazit und Ausblick

Heavy Duty



#3

BiFoilStack – Neuartige
verbundfolienbasierte
Zell- und Stapeldesigns
für Schwerlastbrennstoff-
zellensysteme



Der Verkehrssektor ist einer der größten Treiber des Klimawandels. Während der Übergang von fossilen zu nachhaltigen Lösungen für Pkw in vollem Gange ist, hinkt der Schwerlastsektor noch hinterher. Brennstoffzellen sind als ein Eckpfeiler für die Energiewende im Schwerlastsektor anerkannt. Die Herstellbarkeit und die Haltbarkeit sind jedoch aktuelle Herausforderungen für den Einsatz von Brennstoffzellen im Schwerlastverkehr. Polymer-Elektrolyt-Membran (PEM) Brennstoffzellen sind der bevorzugte Brennstoffzellentyp. Insbesondere die Bipolarplatten (BPP) sind eine wichtige Komponente für Verbesserungen in Bezug auf Herstellbarkeit und Haltbarkeit. Sie bestehen meist aus metallischem oder graphitischem Material. Beide haben ihre individuellen Vor- und Nachteile. Graphitplatten weisen eine hervorragende Haltbarkeit auf, sind aber relativ dick, was die Leistungsdichte des Brennstoffzellensystems verringert. Zudem sind die Fertigungsverfahren nicht für eine kostengünstige Großserienproduktion geeignet. Metallische Bipolarplatten sind viel dünner und die Herstellungsprozesse sind leicht skalierbar und kostengünstig. Die feuchte und saure Umgebung innerhalb der Brennstoffzelle führt jedoch zur Korrosion von Metallplatten und Beschichtungen – oder es müssen hochwertige Materialien verwendet werden.

Um diese Herausforderungen zu meistern und die Vorteile von metallischen und graphitischen Bipolarplatten zu kombinieren, hat das Fraunhofer UMSICHT ein neuartiges Verfahren für Graphit-Polymer-Verbundwerkstoffe entwickelt, das sich für die großtechnische Produktion von PEM-Brennstoffzellen eignet.

Im Rahmen des öffentlich geförderten Projekts „BiFoilStack – Neuartige verbundfolienbasierte Zell- und Stapeldesigns für Schwerlastbrennstoffzellensysteme“ werden innovative Stack- und Montagekonzepte entwickelt, welche die neuen Freiheitsgrade der folienbasierten Platten ausnutzen.

Anforderungen an Heavy-Duty-Stacks

Brennstoffzellen für Schwerlastanwendungen erfordern hohe Haltbarkeit und Zuverlässigkeit, niedrige Produktionskosten, hohe Effizienz sowie hohe Leistungsdichte. Um diese Ziele innerhalb von BiFoilStack zu erreichen, werden die folgenden Lösungen eingesetzt:

- Haltbarkeit: Verwendung von Graphit-Polymer-Verbundfolien zur Minderung der Korrosion der Bipolarplatten und Strömungsfelddesigns zur Reduktion mechanischer und chemischer Abbaueffekte auf Ebene der Membran-Elektroden-Einheit (Membrane Electrode Assembly, MEA).

- Leistungsdichte: Geringe Substratdicke von BPP im Bereich von metallischen BPP und deutlich dünner im Vergleich zu herkömmlichen graphitischen Platten sowie hohe Ausnutzung der gesamten Zellfläche für die Stromerzeugung.
- Produktionskosten: Rolle-zu-Rolle Prozess für BPP ohne Beschichtung und neuartige Stack-Konzepte
- Hohe Effizienz: Innovatives Strömungsfeld mit verbesserten Stofftransporteigenschaften und reduzierten elektrischen Widerständen

Neben den oben genannten allgemeinen Zielen müssen je nach Anwendung spezifische Anforderungen definiert werden, um den Entwicklungsprozess zu beginnen. Zu deren Ableitung werden zunächst die anteiligen CO₂-Emissionen neu verkaufter Lkw an den Gesamtemissionen analysiert. Es wurde festgestellt, dass mehr als die Hälfte der CO₂-Emissionen im Zusammenhang mit dem Neukauf von schweren Nutzfahrzeugen auf 4x2-Zugmaschinen mit mehr als 16 Tonnen zurückzuführen sind. Diese Lkw haben typischerweise eine Verbrennungsmotorleistung von 250 bis 380 kW. Die meistverkaufte Motorisierung weist eine Leistung von 340 kW auf. Aus diesem Grund wird eine Nettoleistung des Brennstoffzellensystems von 300 kW angestrebt, weil der Spitzenleistungsbedarf durch Elektrifizierung und Hybridisierung reduziert werden kann. Um den

Leistungsbedarf der NebenkompONENTEN des Brennstoffzellensystems zu berücksichtigen, wird eine Stack-Leistung von 340 kW angestrebt.

Für die Definition des verfügbaren Bauraums innerhalb des Lkw werden Größenstandards aus dem öffentlich geförderten Forschungsprojekt StasHH (www.stashh.eu) verwendet. Die Standardgröße für Motorraumeinbau eines 40-Tonner-Lkw beträgt 1.360x1.020x700 mm. Diese Box muss das gesamte System aufnehmen.

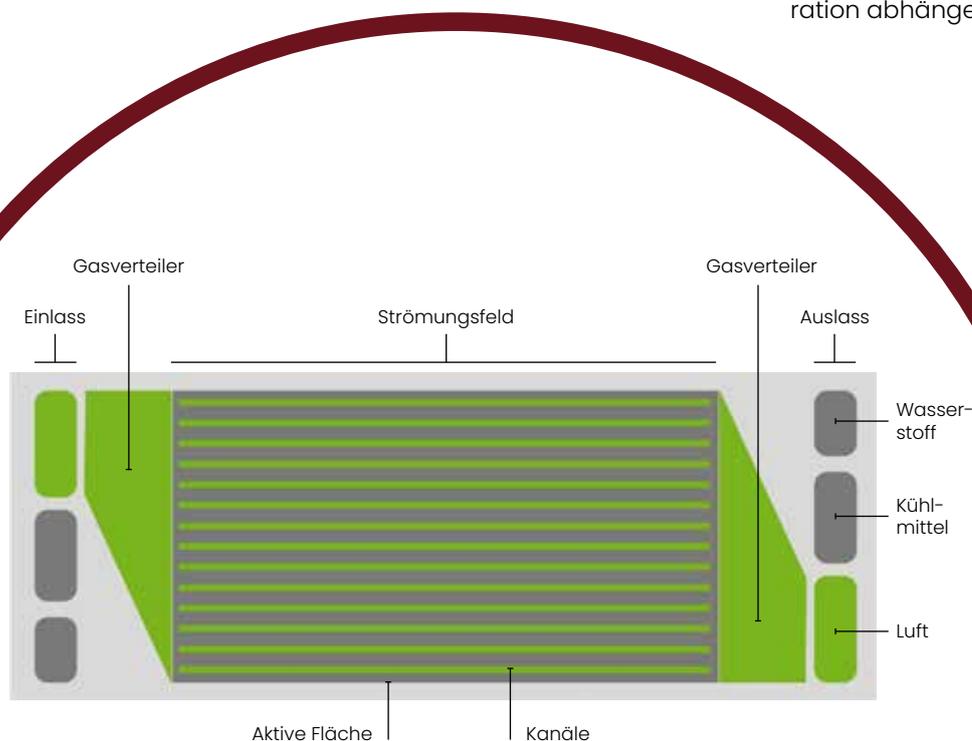
Unter Berücksichtigung der aktuellen Einschränkungen der Leistungselektronik, der Fahrzeugelektronikarchitektur, der verfügbaren Komponenten und der Größenbeschränkungen wurden die folgenden Spezifikationen abgeleitet:

- Anzahl der Stapel: 2
- Zellen pro Stapel: 400
- Aktive Fläche pro Zelle: 350 cm²
- Auslegungsarbeitspunkt: 0,6 V @ 2 A/cm²
- Stackleistung: 2 x 168 kW = 336 kW

Konzeptionelles Zelldesign

Das Design einer Zelle kann in drei Hauptbereiche eingeteilt werden: I) Kanäle, II) Wasserstoff, Luft und Kühlmittelströmungsfeld und III) Ports.

Der Fokus liegt auf dem Strömungsfeld, da dieses für die Zelleistung entscheidend ist. Die Fluidzufuhr muss möglichst homogen sein, da die elektrochemischen Reaktionsgeschwindigkeiten hauptsächlich von der lokalen Spezieskonzentration abhängen. Um das zu erreichen, werden



1. Schematischer Aufbau einer Brennstoffzellen-Bipolarplatte

für gewöhnlich Gasverteiler verwendet (Abbildung 1). Aktuelle Zellen (Toyota, Hyundai) nutzen einen Gasverteiler und weisen ein Verhältnis von Gesamtfläche zu aktiver Fläche von 1,9 bis 2,3 auf.

Unter Berücksichtigung des Leistungsdichteziels von 5 kW/l und einer Zeldicke von 1,8 mm aus den Materialrandbedingungen des BiFoil-Stack-Projekts, muss ein Verhältnis von Gesamt- zur aktiven Fläche von $<1,32$ angestrebt werden. Dies kann nur durch den Wegfall des Gasverteilers und den Betrieb bei hoher Stromdichte erreicht werden.

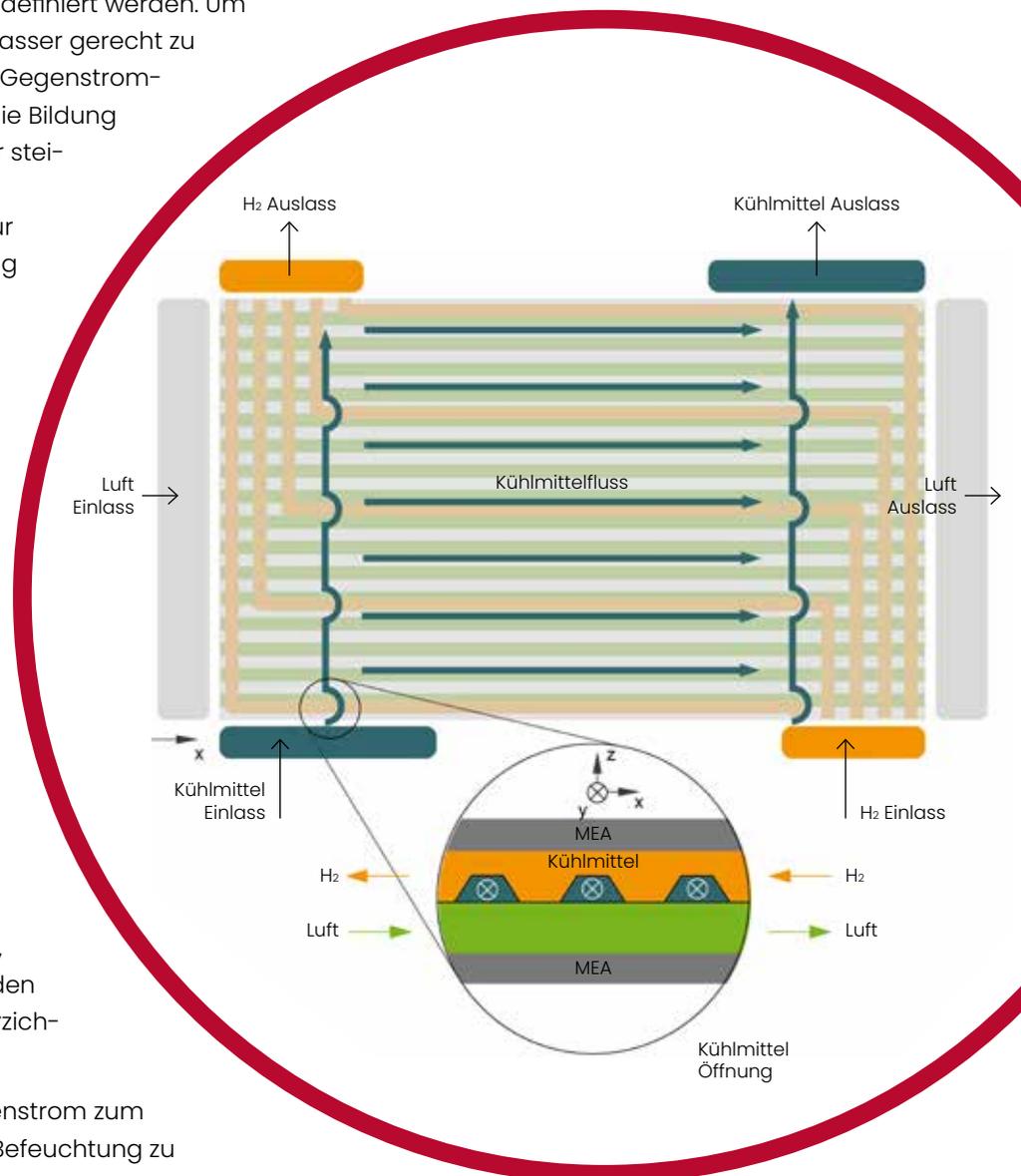
Definition des Strömungsfeldkonzepts

Für die Definition der Ports und Kanäle der Zelle muss zunächst das übergeordnete Strömungsfeld definiert werden. Um den hohen Produktionsraten von Wasser gerecht zu werden, sind Luft und Kühlmittel im Gegenstromprinzip angeordnet. Dies reduziert die Bildung von flüssigem Wasser aufgrund der steigenden Temperatur stromabwärts. Luft- und Wasserstoffströme sind für die interne Befeuchtung gegenläufig ausgeführt. Dies ist insbesondere im Bereich des Lufteinlasses wichtig.

Für eine Brennstoffzelle ist das Kathodenströmungsfeld das kritischste. Gründe dafür sind die langsame Sauerstoffreduktionsreaktion und das Vorhandensein von flüssigem Wasser. Eine effiziente Wasserabfuhr wird mit kurzen Kanälen erreicht. Zusätzlich werden Biegungen in den Kanälen vermieden, um Wasseransammlungen weiter zu reduzieren. Deswegen wird das Kathodenströmungsfeld mit geraden, parallelen Kanälen ausgeführt, welche direkt mit dem Port verbunden sind. Auf einen Gasverteiler wird verzichtet (Abbildung 2).

Der Wasserstoffstrom wird im Gegenstrom zum Luftstrom realisiert, um die interne Befeuchtung zu nutzen. Um die Ein- und Auslassöffnungen zu verbinden und eine weitestgehende Gegenstromanordnung zu realisieren, werden die Wasserstoffkanäle Z-förmig durch das Strömungsfeld geführt. Die vertikalen Wasserstoffkanäle am Lufteinlass und -auslass unterstützen aufgrund der langen Kontaktzeiten die interne Wasserrückführung durch die Wasserstoffkanäle.

2.
Zellkonzept inklusive
aller Strömungsfelder





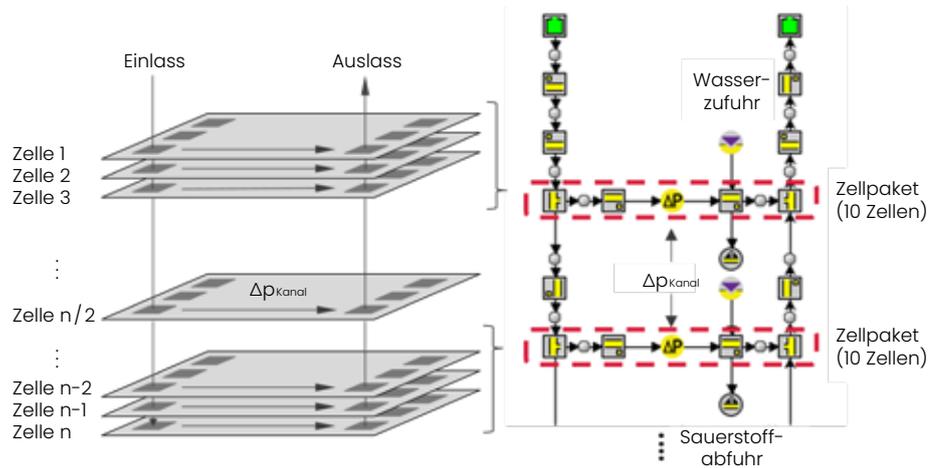
Für das Einbringen des Kühlmittels zwischen Kathode und Anode müssen geeignete Öffnungen geschaffen werden, um das Kühlmittel zwischen die Bipolarplatten einzubringen. Die Wasserstoffkanäle werden für diese Öffnungen verwendet, um den Luftstrom nicht zu stören.

Port-Definition

Ein weiterer wichtiger Aspekt des Zelldesigns sind die Ein- und Auslasskanäle für Wasserstoff, Luft und Kühlmittel. Hauptaufgabe der Ports ist die Verteilung der Fluide in die einzelnen Zellen, bei geringen Druckverlusten und Zell-zu-Zell-Variation.

Um die Auswirkungen der Ein- und Auslassports auf die Leistungsdichte sowie die Zell-zu-Zell-Variation zu untersuchen wurde ein 1D-Strömungsmodell entwickelt (Abbildung 3).

Die Optimierung der Kathodenkanäle ist in Abbildung 4 für einen Einlass von $14,5 \text{ cm}^2$ und Kanaldruckverluste von 200 mbar dargestellt. Die obere Grafik zeigt die maximale Massenstromabweichung eines Zellpakets im Vergleich zum Flächenverhältnis von Auslass- zu Einlassport. In der Grafik ist die Massenflussabweichung der einzelnen Zellpakete dargestellt.

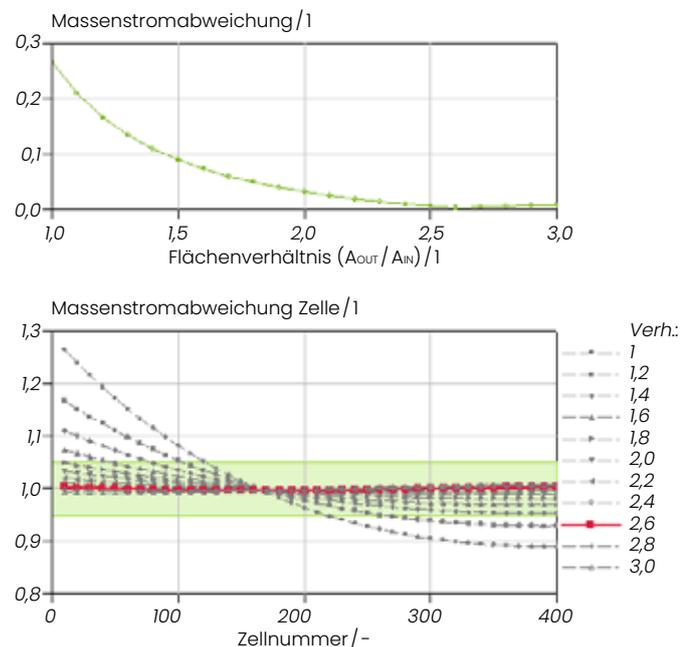


3. Links: Schematische Darstellung eines Brennstoffzellenstapels. Rechts: Modellierungsansatz für das Portdesign

»Beim Design einer Zelle kommt dem Kühl-
mittelströmungsfeld mit seinem Einfluss auf
die Zelleistung die höchste Wichtigkeit zu.«

Wie Abbildung 4 zeigt, nimmt die Massenstromabweichung mit zunehmendem Flächenverhältnis – d. h. der Austrittsfläche – ab, bis eine minimale Abweichung für ein Flächenverhältnis von 2,6 erreicht ist. Grund für dieses Verhalten ist die variierende statische Druckdifferenz zwischen den Zellen, die den Massenstrom antreibt. Im Idealfall (Verhältnis = 2,6) ist die statische Druckdifferenz für alle Zellen gleich. Während der Portauslegung kann der statische Druck im Auslass über die Einstellung des dynamischen Drucks, d. h. der Fluidgeschwindigkeit, durch die Einstellung des Auslassquerschnitts gesteuert werden. Durch die Optimierung des Querschnitts kann die Zell-zu-Zell-Variation minimiert werden.

4. Ergebnisse der Kathodenportstudie für eine Einlassquerschnitt von 14,5 cm²



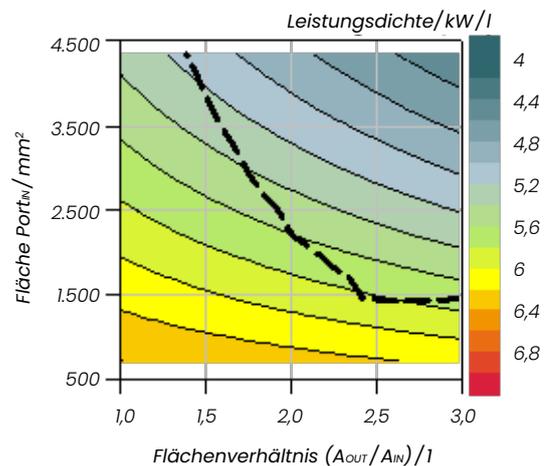
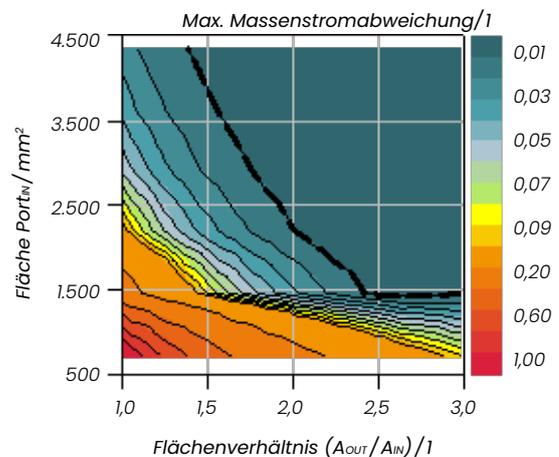
Um den Einfluss des Einlasses zu untersuchen und die gesamte Portfläche in Bezug auf die Leistungsdichte des Stapels abzuleiten, sind die Ergebnisse aller durchgeführten Simulationen in Abbildung 5 dargestellt.

Das obige Kennfeld zeigt, dass die Zell-zu-Zell-Variation mit abnehmendem Einlassquerschnitt bei konstantem Flächenverhältnis zunimmt. Dies ist auf die zunehmende Fluidgeschwindigkeit zurückzuführen, die durch die abnehmende Fläche und den damit höheren dynamischen Druck verursacht wird. Dies führt zu einer größeren statischen Druckdifferenz zwischen den einzelnen Zellen und einer höheren Massenstromabweichung. Um die Auswirkungen des dynamischen Drucks mit abnehmendem Einlassquerschnitt zu kompensieren, muss der Auslassquerschnitt kontinuierlich vergrößert werden, um die Zell-zu-Zell-Variation konstant zu halten.

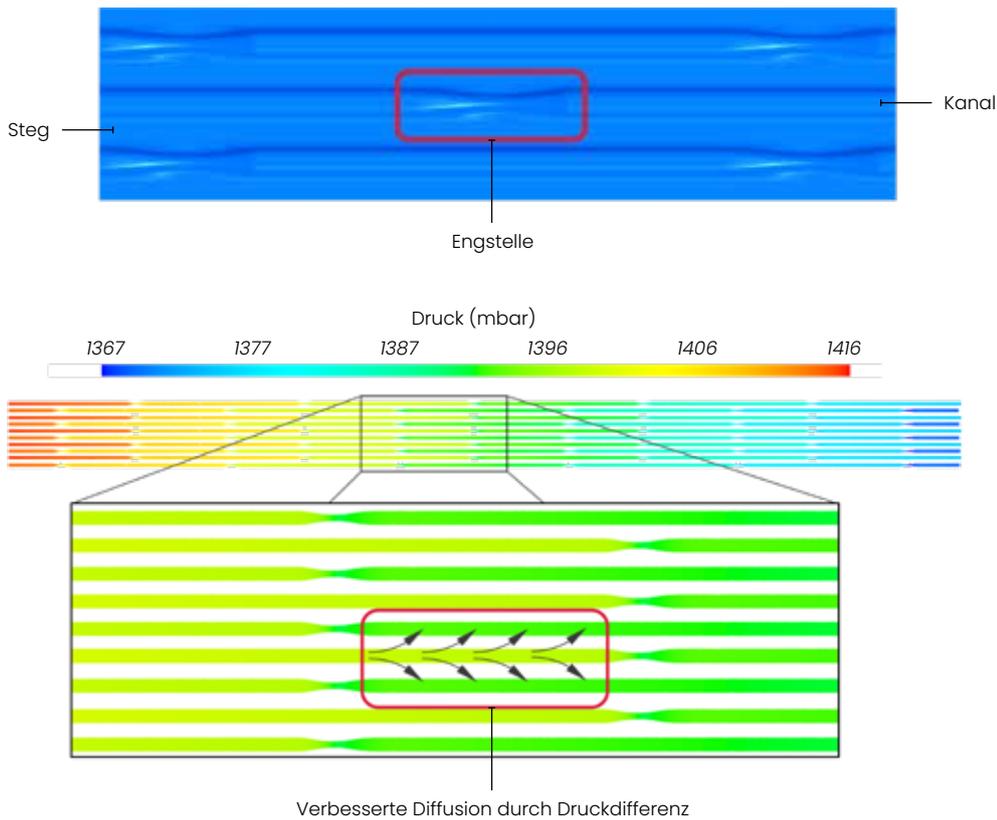
Weil die Ports notwendig sind, aber nicht zur Stromerzeugung beitragen, ist es wünschenswert, den gesamten Portquerschnitt zu reduzieren und gleichzeitig die Zell-zu-Zell-Variation auf ein Minimum zu beschränken. Diese Beziehung ist in der unteren Grafik von Abbildung 5 dargestellt. Bei konstanter Zell-zu-Zell-Variation (gestrichelte Linie) wird deutlich, dass ein Optimum in Bezug auf die Leistungsdichte besteht. Im vorliegenden Fall ist dieses Optimum bei 1.450 mm² Einlassöffnungsquerschnitt und einem Verhältnis von 2,4 zu finden.

Kanaldefinition

Neben dem Kanalquerschnitt kann auch die Form entlang der Kanalrichtung zur Optimierung der Leistung der Brennstoffzelle genutzt werden. Aufgrund der hohen Produktion von flüssigem Wasser müssen Maßnahmen zum Austrag dessen getroffen werden. Mehrere Engstellen entlang des Kanals haben sich hierfür als geeignet erwiesen, weil der erhöhte Druck vor der Engstelle die Diffusion unter den Rippen und den Wasseraustrag erleichtert. Solche Engstellen sind in Abbildung 6 dargestellt.



5. Kennfelder der maximalen Massenstromabweichung zwischen den Zellen und die Leistungsdichte des Stacks (aktive Fläche plus gesamte Portfläche). Die gestrichelte Linie zeigt die Iso-Linie bei 1 Prozent Massenstromabweichung.



6. CFD-Simulation mit wechselnden Engstellen im parallelen Kathodenströmungsfeld

TEXT

Dr. Marius Zubel
zubel@fev.com

Dr. Marius Walters
walters_m@fev.com

Julian Toussaint
Lehrstuhl für Thermodynamik
mobiler Energiewandlungs-
systeme an der RWTH Aachen

Fazit

Neuartige Materialien für Bipolarplatten, welche die Vorteile von metallischen und graphitischen Platten vereinen, haben das Potenzial, die Skalierung der Brennstoffzellentechnologie auf den Markt zu erleichtern. Das sorgfältige Design der Zelle, welches die positiven Eigenschaften des Materials ausnutzt, kann die Performance und die Leistungsdichte weiter verbessern. Dies wurde am Beispiel des Portdesigns und des Zellkonzepts gezeigt. Die Leistungsdichte konnte unter Berücksichtigung der aktiven Fläche und Portfläche auf $>6,4 \text{ kW/l}$ gesteigert werden, trotz der derzeit 2,5-fach dickeren Materialstärke im Vergleich zu metallischen Platten.

Innovative Lösungen für die Herausforderungen der intelligenten Mobilität



feel evolution



The background features a dark blue, abstract design with light trails and binary code (0s and 1s) in shades of blue and red. The bottom portion shows a blurred city street at night with light trails from cars and buildings.

FEV.io adressiert die steigenden Anforderungen, Bedürfnisse und das Entwicklungstempo im Bereich der intelligenten Mobilität. Durch unser tiefes Verständnis von Software und Elektronik in Kombination mit detailiertem Know-how in allen Fahrzeugbereichen, die für die Entwicklung von intelligenten Mobilitätslösungen erforderlich sind, bieten wir unseren Kunden erstklassige Ingenieurdienstleistungen. Das Portfolio von FEV.io erstreckt sich auf sieben Domänen: Systems Engineering, Funktionale Sicherheit & Cyber Security, Vernetzte Mobilität, ADAS/AD, Infotainment, SW & EE Plattformen, SW & EE Integration.

#4

Thermische Integration

von elektrischen Hochdreh-
zahlantrieben in elektrischen
Antriebssträngen



Die Automobillandschaft verändert sich aktuell schnell hin zu emissionsfreien Elektrofahrzeugen. Derzeit werden in diesen aufgrund ihres hohen Wirkungsgrads und ihrer hohen Leistungsdichte überwiegend permanentmagneterregte elektrische Traktionsmaschinen eingesetzt. Hochenergie-Permanentmagnete sind jedoch auf Seltene Erden angewiesen, die als kritischen Rohstoffe gelten und empfindlich gegenüber geopolitischen Entwicklungen sind. Außerdem stehen diese magnetischen Materialien nicht im Einklang mit einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft.

»FEV hat einen thermischen Konditionierungsansatz entwickelt, der den Wirkungsgrad und die Überlastfähigkeit elektrischer Maschinen verbessert.«

FEV sieht zwei Möglichkeiten, dieses Problem zu lösen. Erstens können elektrische Maschinen vollständig magnetfrei ausgelegt werden, was jedoch mit einer Reduzierung der Leistungsdichte aufgrund der fehlenden inhärenten Magnetisierung einhergeht. Eine Alternative ist die Verwendung von elektrischen Traktionsmaschinen mit reduziertem Seltenerdmetallanteil oder eine Erhöhung der Leistungsdichte, um den Materialeinsatz bei gleichbleibender Leistung zu reduzieren. Die Leistungsdichte einer elektrischen Maschine kann bei gleichem Bauraum entweder durch Erhöhung der Drehzahl und/oder durch Erhöhung des Drehmoments gesteigert werden.

Mit dem Ansatz, die Leistungsdichte durch hohe Drehzahlen zu erhöhen, treten Effekte auf, die nicht auf die elektrische Maschine beschränkt sind, sondern den gesamten Antriebsstrang betreffen können. Der Grenzwert für die Maximaldrehzahl elektrischer Maschinen ist die Rotorumfangsgeschwindigkeit. Die Grenze der wirtschaftlich realisierbaren Rotorumfangsgeschwindigkeiten liegt typischerweise bei 100 m/s bis 150 m/s. Zweistufige Getriebe mit einer Zwischenwelle sind Stand der Technik. Mit zunehmender Anzahl der Getriebestufen nimmt der Wirkungsgrad des Getriebes ab. Solange keine weiteren Zwischenwellen hinzukommen, ändern sich die Kosten und Verluste nicht wesentlich. Bei einem Übersetzungsverhältnis von 1:4 pro Stufe kann theoretisch ein Gesamtübersetzungsverhältnis von 1:16 erreicht werden. Allerdings sind Übersetzungen über etwa 1:10 mit zusätzlichem Aufwand verbunden. Aus diesem Grund geht FEV davon aus, dass sich die Drehzahlen für elektrische Traktionsmaschinen in der nahen Zukunft zwischen 20.000 min^{-1} und 30.000 min^{-1} bewegen werden.

Eine Erhöhung der Ströme und damit der Stromdichte führt zu einer Erhöhung des Drehmoments, aber gleichzeitig zu zusätzlichen Kupferverlusten, die durch eine Verbesserung des Kühlsystems abgeführt werden müssen. Alternativ kann eine höhere Wicklungstemperatur durch die Verwendung hochwertigerer Isolierstoffmaterialien

zugelassen werden. Mit aktuellen Auslegungen erreicht das Fahrzeug das Ende seiner Lebensdauer, bevor das Isolierstoffsystem versagt. Dadurch ergibt sich ein thermischer Spielraum. Dieser kann genutzt werden, um die Wicklungstemperatur zu erhöhen, ohne höherwertige Materialien zu verwenden.

Da höhere Leistungen und damit höhere Verluste auf ein kleineres Volumen konzentriert werden, wird die Kühlung immer wichtiger. Einen vielversprechenden Ansatz, um eine effektiv höhere Leistungsdichte und damit einen geringeren Permanentmetallanteil und eine bessere Gesamtleistung zu erreichen, sieht FEV im aktiven thermisch optimalen Betrieb in speziell dafür ausgelegten elektrischen Maschinen. Schwerpunkte bei der Auslegung und bei der Entwicklung einer aktiven thermischen Konditionierung sind die erweiterte und erhöhte Überlastfähigkeit, die Erhöhung des Dauerbetriebsbereichs und die bereits von FEV untersuchte aktive thermische Feldschwächung.

FEV hat dabei einen Ansatz der thermischen Konditionierung entwickelt, um den Wirkungsgrad und die Überlastfähigkeit elektrischer Maschinen zu verbessern. Um die thermisch aktive Konditionierung voll ausnutzen zu können, muss eine transiente und möglichst unabhängige Temperierung in den Komponenten der elektrischen Maschine gewährleistet werden. Je schneller die Temperatur angepasst werden kann, desto schneller können die angestrebten Betriebsparameter erreicht werden. Dazu wird ein simulativer Vergleich einer von FEV neu entwickelten hochdrehenden elektrischen Maschine und einer Traktionsmaschine nach dem Stand der Technik durchgeführt – beide mit einer Spitzenleistung von mehr als 150 kW. Die zwei Maschinen sind zunächst mit einer Gehäusewassermantelkühlung ausgestattet. Es werden elektromagnetische und thermische Simulationen durchgeführt und es wird deutlich, dass die von FEV neu entwickelte Maschine im Vergleich zum Stand der Technik ein dynamischeres thermisches Verhalten aufweist. Dies lässt sich durch die geringeren thermischen

Massen von Stator und Rotor sowie durch eine höhere Verlustdichte erklären. In Anbetracht des höheren Drehzahlbereiches der neu entwickelten Maschine von bis zu 24.000 min^{-1} wird die Verlustdichte in weiten Betriebsbereichen sogar noch höher sein, was die thermische Dynamik zusätzlich erhöht.

FEVs Entwurf von elektrischen Hochdrehzahlmaschinen für thermisch aktive Konditionierung

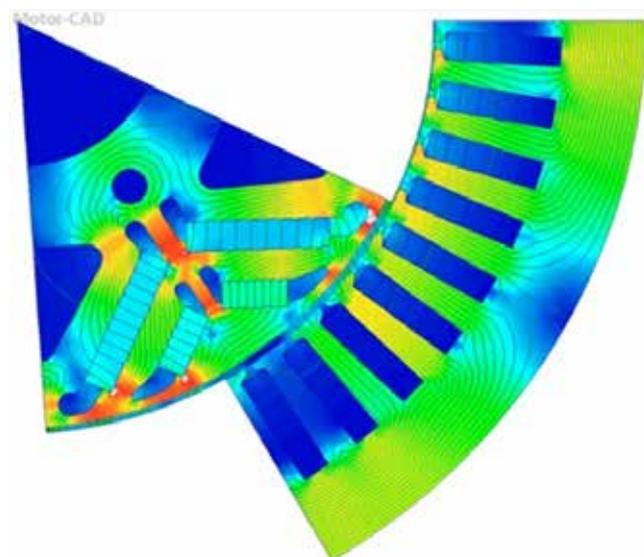
Für den Entwurf von elektrischen Maschinen hat FEV ein Auslegungswerkzeug zur Bestimmung der Hauptabmessungen entwickelt. Dieses wird in einem ersten Schritt der Auslegungswerkzeugkette verwendet. Sobald die Abmessungen definiert sind und die Rortopologie feststeht, folgen Iterationen zur Erreichung der anwendungsspezifischen Anforderungen. Die gesamte Werkzeugkette besteht aus der Definition der Anforderungen, der grundlegenden Dimensionierung, elektromagnetischen und thermischen Simulationsiterationen und schließlich mechanischen Simulationen mit potenziell weiteren Iterationen zwischen den verschiedenen Disziplinen.

Die Rotortopologie mit einer doppelten V-förmigen Magnetanordnung, wie sie in Abbildung 1 zu sehen ist, wird aufgrund des hohen Wirkungsgrads und der gewünschten Drehmoment-Drehzahl-Charakteristik gewählt. Formoptimierte Flussbarrieren, welche die mechanische Stabilität auch für hohe Drehzahlen gewährleisten und die Möglichkeit der Kühlmittelführung bieten, sind in diesem Entwurf enthalten.

Eine Hauptanforderung bei der elektromagnetischen und thermischen Auslegung ist, dass die Temperaturgrenzen aller Komponenten eingehalten werden. Bei permanentmagneterregten Maschinen sind dies in der Regel das Isolierstoffsystem oder die Permanentmagnete. Ein Ziel der entwickelten Hochdrehzahlmaschine ist die Minimierung der thermischen Zeitkonstanten und die unabhängige Komponentenkühlung, insbesondere für die Magnete im Rotor.

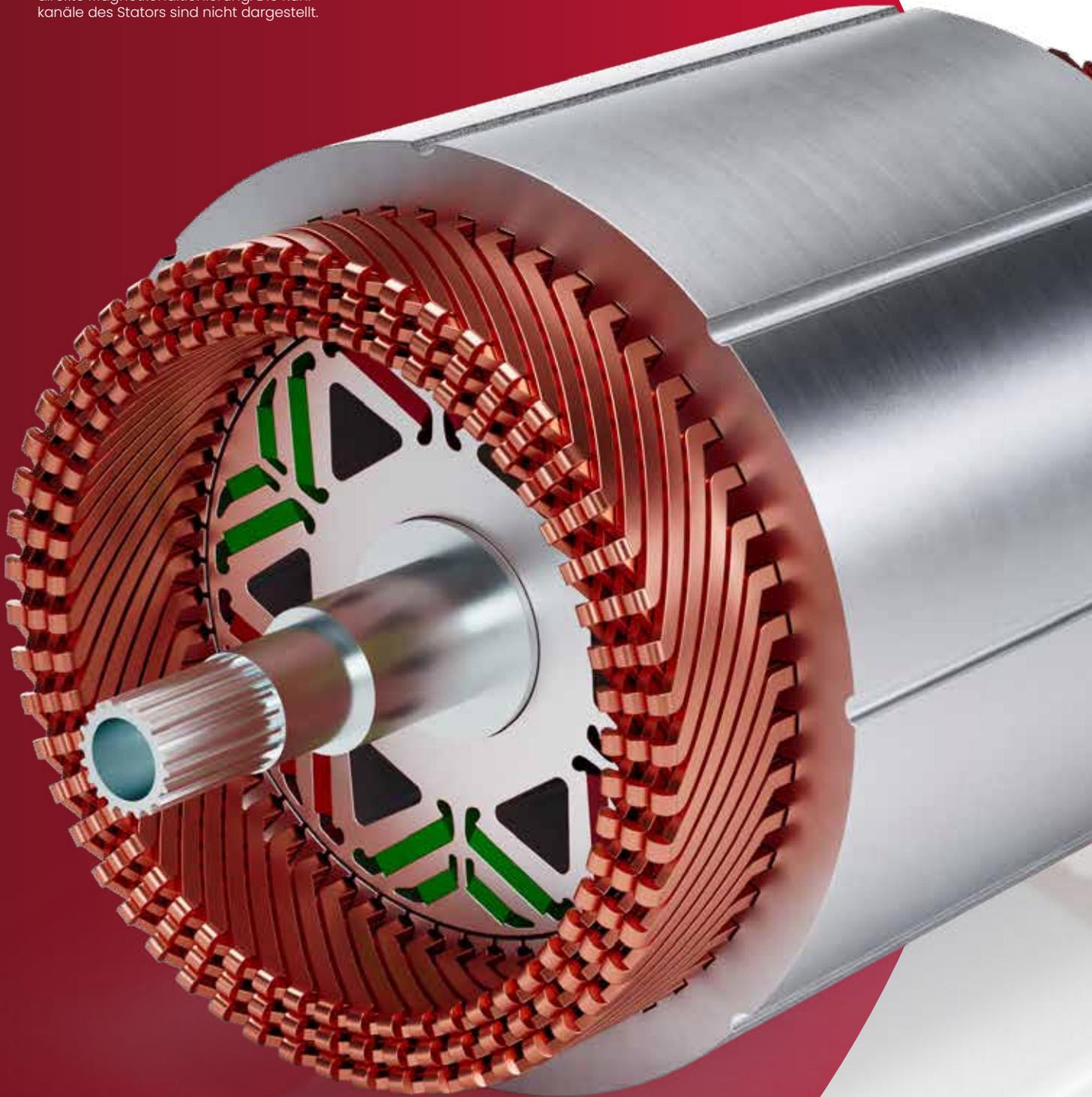
Im Anschluss an die elektromagnetischen und thermischen Entwurfsiterationen wird eine mechanische Bewertung und Optimierung der

1. Beispielhafte Flussdichteverteilung in der von FEV neu entwickelten elektrischen Hochdrehzahlmaschine.



2.

Elektromagnetisch aktive Komponenten der von FEV entwickelten Hochdrehzahlmaschine, mit Steckspulen (Hairpin-Technologie) und einer Rotortopologie mit einer doppelten V-förmigen Magnetanordnung mit Flussbarrieren für die direkte Magnetkonditionierung. Die Kühlkanäle des Stators sind nicht dargestellt.



Rotorgeometrie durchgeführt, um Drehzahlen über 20.000 min^{-1} zu gewährleisten. Ein wichtiges Thema sind dabei die Magnetkühlkanäle in der Nähe der Magnete. Einerseits müssen diese Kanäle breit genug sein, um das Kühlmittel effektiv zu leiten und die magnetische Funktion der Flusssperre zu erfüllen, andererseits schwächen zu breite Kanäle die mechanische Stabilität.

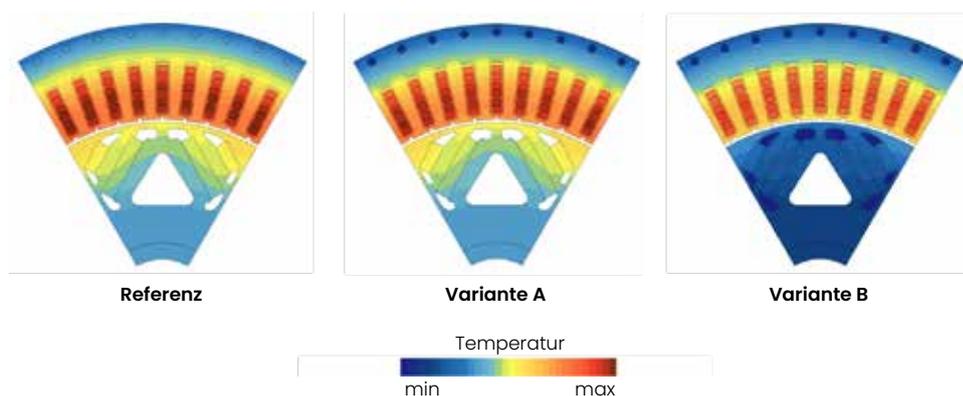
Die aktiven Bauteile der Hochdrehzahlmaschine sind in Abbildung 2 dargestellt. Um die Leistung im Dauerbetrieb zu bestimmen, wird zunächst ausschließlich eine dem Stand der Technik entsprechende Wassermantelkühlung verwendet. Diese wird für die Simulation in einem thermischen Netzwerkmodell abgebildet und mit Wärmeübergangskoeffizienten parametrisiert, welche aus Fluidynamiksimulationen bestimmt werden.

Thermische Modellierung verschiedener Kühlkonzepte für elektrische Maschinen

Bei der Entwicklung elektrischer Maschinen müssen die elektromagnetischen und thermischen Wechselwirkungen bereits in einem frühen Entwurfsstadium berücksichtigt werden. Bei neu entwickelten Kühlkonzepten ist es nicht trivial, die tatsächlichen Wärmeübergangskoeffizienten zu bestimmen. Einerseits können rechenintensive und genaue Fluidynamiksimulationen dieser Konzepte die resultierende Temperaturverteilung in der elektrischen Maschine sowie das räumliche Kühlvermögen genau bewerten. Andererseits sind diese Simulationen rechnerisch deutlich aufwendiger als thermische Netzwerkmodelle mit konzentrierten Parametern. Insbesondere wenn in der Entwurfsphase verschiedene Kühltopologien, vollständige Kennfelder und ganze Fahrscenarien evaluiert werden sollen, ist es nicht praktikabel, gekoppelte elektromagnetische Simulationen und thermische Fluidynamiksimulationen durchzuführen.

Um eine zuverlässige Simulationsgrundlage zu schaffen, werden die rechenintensiven Fluidynamiksimulationen daher zunächst nur für einen repräsentativen stationären Betriebspunkt durchgeführt. Diese Simulationen geben einen guten Anhaltspunkt für die Wärmeübergangskoeffizienten von den Bauteilen der elektrischen Maschine zum Kühlsystem. Mit diesen Koeffizienten wird das thermische Netzwerkmodell parametrisiert. Es wird ein Netzwerkmodell aufgestellt, das die gesamte elektrische Maschine in axialer und radialer Richtung abbildet. Materialparameter und Wärmeübergangskoeffizienten werden berücksichtigt. Effektive Wärmeleitfähigkeiten für das Isolierstoffsystem der Wicklung und für die Elektrobleche in radialer und axialer Richtung werden verwendet, um die tatsächlichen Eigenschaften darzustellen. Es wird eine drehzahlabhängige Wärmeleitfähigkeit im Luftspalt der elektrischen Maschine verwendet.

In diesem Artikel werden durch FEV drei Kühlsysteme untersucht. Die grundlegenden Unterschiede zwischen den Kühlsystemen liegen zum einen in der Art des Kühlmittels und zum anderen in der Lage der Kühlkanäle. Für die Referenz wird eine Gehäusewassermantelkühlung mit einem Wasser-Ethylenglykol-Gemisch gewählt, welche den aktuellen Stand der Technik repräsentiert. Für Variante A wird zusätzlich eine direkte Statorölkühlung hinzugefügt und für Variante B eine zusätzliche direkte Rotorölkühlung, welche eine Magnetkonditionierung ermöglichen soll. Aufgrund der dielektrischen Eigenschaften wird ein Kühlmittel auf Ölbasis verwendet. Die direkte Statorölkühlung und die Rotorkonditionierung sind in elektrischen Traktionsmaschinen noch nicht weit verbreitet, haben aber die Vorteile, dass das Kühlmittel näher an den zu kühlenden bzw. zu konditionierenden Bauteilen ist und somit ein dynamischeres thermisches Verhalten, eine präzisere Bauteiltemperatur sowie geringere Temperaturgradienten innerhalb der elektrischen Maschine gewährleistet werden können. Nachteilig sind der höhere konstruktive Aufwand und eine herausfordernde Absicherung der Dichtigkeit.



Die Unterschiede zwischen den drei Kühlkonzepten für die resultierende radiale Temperaturverteilung sind in Abbildung 3 dargestellt. Die zusätzliche direkte Statorölkühlung in Variante A hat nur einen geringen Einfluss auf die Rotortemperaturen. Dies erklärt sich durch die hohen Kupferverluste in den Wicklungen, die zwischen Kühlung und Rotor liegen. Die niedrigeren Temperaturen in den Wicklungen sind auf den geringeren effektiven Widerstand zwischen der Wärmequelle in der Wicklung und der Statorölkühlung zurückzuführen. Eine weitere Temperaturabsenkung kann durch eine zusätzliche direkte Kühlung des Rotors in Variante B erreicht werden. Die Temperatur im Rotor liegt nahe an der Kühlmitteltemperatur. Die Wicklungstemperatur zeigt ebenfalls eine weitere Reduktion im Vergleich zur Referenz und zur Variante A.

3. Resultierende radiale Temperaturverteilung in der Hochdrehzahlmaschine bei einem stationären Betriebspunkt, für die Referenz (links), Variante A (Mitte) und Variante B (rechts).

TEXT

Dr. Michael Schröder
schroeder_mi@fev.com

Christian Monissen
monissen_c@fev.com

Janis Brächter
braechter@fev.com

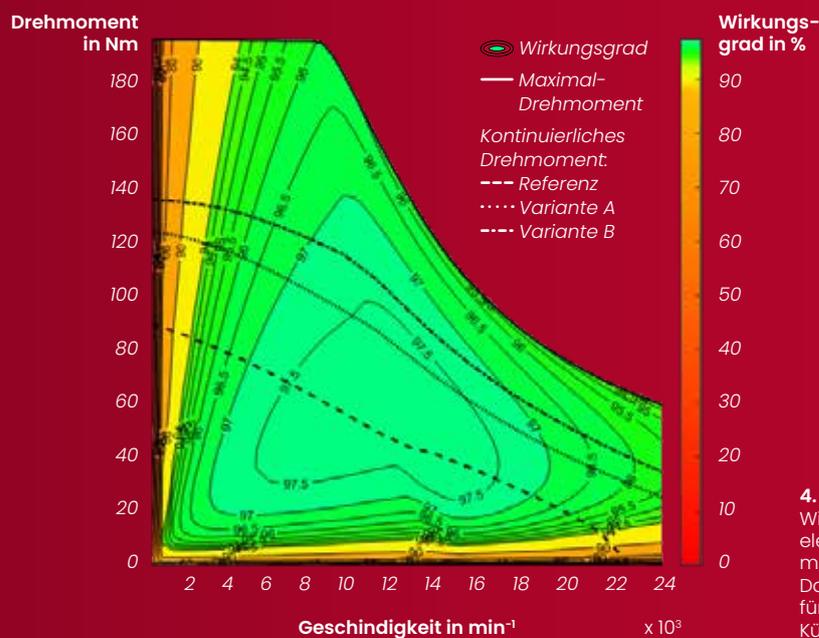
Ergebnisse

Das resultierenden Wirkungsgradkennfeld und die jeweiligen Dauerdrehmomentkennlinien für die drei untersuchten Kühlkonzepte sind in Abbildung 4 dargestellt. Die Referenz zeigt das niedrigste Dauerdrehmoment mit etwa 50 Prozent des maximalen Drehmoments im niedrigen Drehzahlbereich. Über 22.500 min^{-1} ist kein Dauerbetrieb mehr möglich was u. a. auf die Temperaturgrenze der Magneten zurückzuführen ist. Ein erhöhter Dauerbetrieb ist mit den angepassten Kühlvarianten möglich. Das maximal mögliche Drehmoment wird nicht verändert, aber die Zeit, in der dieses zur Verfügung steht, kann durch die besseren Kühlkonzepte verlängert werden. Das Dauerdrehmoment bzw. die -leistung können durch die Anwendung der zusätzlichen Kühlkonzepte deutlich verbessert werden.

Durch den Einsatz der direkten Stator Kühlung in Variante A, kann im Vergleich zur Referenz eine Steigerung des Dauerdrehmoments um ca. 50 Nm erreicht werden. Dies ist auf die effektivere Wärmeableitung in der Wicklung und somit einen besseren thermischen Zustand in der elektrischen Maschine zurückzuführen. Mit dem zusätzlichen Rotorkühlkonzept in Variante B

wird die thermische Begrenzung der Magnete im Hochdrehzahlbereich weiter herabgesetzt. Aufgrund des guten thermischen Zustands der gesamten Maschine kann das Dauerdrehmoment nochmals um etwa 15 Nm verbessert werden.

Das Konzept der doppelten Ölkühlung mit zusätzlicher Wassermantel-Gehäusekühlung zeigt das höchste Potenzial für eine gezielte und unabhängige Bauteilkonditionierung. Damit kann die Hochdrehzahlmaschine im Bereich der sogenannten aktiven thermischen Feldschwächung betrieben werden, was die Effizienz in Fahrzyklen erhöhen kann sowie eine Überlastfähigkeit gewährleistet.



4. Wirkungsgradkennfeld der elektrischen Hochdrehzahlmaschine und die jeweiligen Dauerdrehmomentkennlinien für die drei untersuchten Kühlkonzepte.



#5

Entwicklung von **Solid-State-Batterien**: Sind lediglich die Batteriezellen zu tauschen?

Der weltweite Trend zur Elektrifizierung von Fahrzeugantrieben führt zu anspruchsvollen Entwicklungszielen für Batteriespeichersysteme. Insbesondere für batterieelektrische Fahrzeuge (BEV), deren Hochvoltbatterie die einzige Energiequelle für den Antrieb darstellt, ist die Reichweite eine Schlüsseleigenschaft. Die heute gewünschten Reichweiten erfordern Energieinhalte von bis zu 120 kWh bei einem Oberklasse-SUV, bei größeren Fahrzeugen sogar noch mehr. Dies wird durch die Erhöhung der Energiedichte in den Batteriezellen, aber auch den Integrationsgrad der Zellen in das Batteriepack angestrebt.

Innovationen bei Batteriezellen stehen im Mittelpunkt zahlreicher akademischer, industrieller und staatlicher Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten. Die Steigerung der Energiedichte bei gleichzeitiger Erhaltung oder Erhöhung der Sicherheit und Leistungsdichte steht im Mittelpunkt der neuen Technologien. Aus diesen Zukunftstrends wird das große Potenzial von Festkörperbatterien (Solid-State-Batteries, SSB) deutlich.

Nach einer kurzen Einführung in die grundlegenden Prinzipien dieser Zelltechnologie werden in diesem Artikel bereits existierende bzw. angekündigte Festkörperzellen und deren Besonderheiten mit Fokus auf deren Einflüsse auf das Systemdesign diskutiert. Die zugrundeliegenden Daten stammen von einer Prototypzelle des Herstellers ProLogium, die im Rahmen einer Kooperation entstanden sind.

Vorteile und Herausforderungen von Festkörperbatterien

- + Potenzial zur Verbesserung der gravimetrischen und volumetrischen Energiedichte um bis zu 40 bzw. 70 Prozent
- + Höhere thermische Stabilität als bei flüssigem Elektrolyten
- + Verbesserte Sicherheit (insbesondere bei Ausfall der externen Heizung) dank des Ersatzes entflammbarer Flüssig- durch Festkörperelektrolyt mit höherer Zersetzungstemperatur
- + Schnelle Ladefähigkeit dank höherer Übertragungszahl für anorganisches Festkörperelektrolyt ($t_{Li^+} \approx 1$ im Vergleich zu 0,2 bis 0,5 für aprotische Elektrolyte)
- Hoher Innenwiderstand, der auf Abbau von Festkörperelektrolyt an Elektrodengrenzfläche zurückzuführen ist; geeignete Elektrodenbeschichtungen sind erforderlich, um Nebenreaktionen zu verhindern
- Herstellung ausreichend dünner Festelektrolyte (ca. 12 μm) mit einer mit Separatoren vergleichbaren Dicke
- Volumenänderungen der Elektroden während des Zyklus führen zu Kontaktverlust zwischen Festelektrolyt und Elektroden

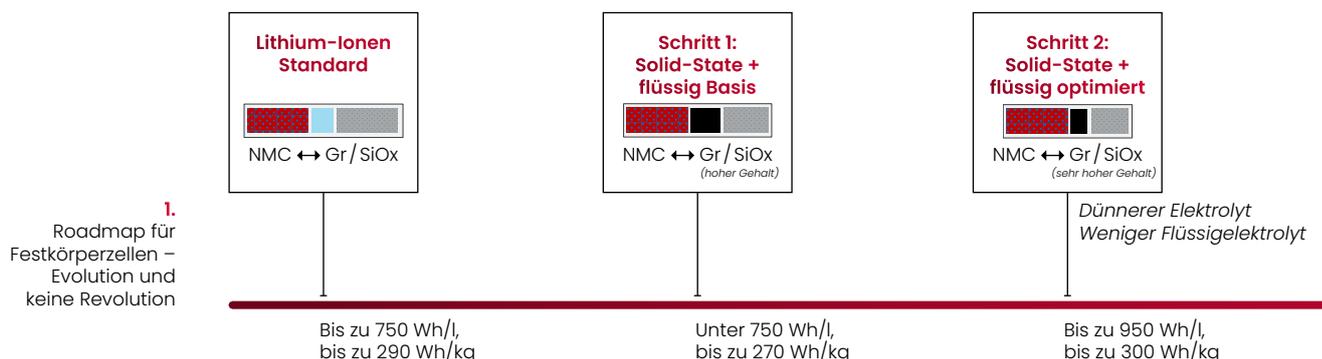
dem polymere und kristalline Elektrolyte entwickelt, um die Sicherheit bei der Verwendung von Lithium-Metall-Anoden zu erhöhen.

Herkömmliche Batterien enthalten eine Graphitanode mit einer theoretischen spezifischen Kapazität von 372 mAh/g. Künftige Generation von Batterien zielen auf Silizium- (3.861 mAh/g) oder Lithiummetallanoden (4.200 mAh/g) mit 10-fach höheren theoretischen Kapazitäten ab, um die Energiedichte zu erhöhen. Flüssige Elektrolyte reagieren jedoch sehr stark mit Si- und Li-Metall-Anoden, was zu einem niedrigen kolumbischen Wirkungsgrad führt. Festkörperelektrolyte hingegen bieten das Potenzial, eine stabile Schnittstelle mit diesen Anoden zu bilden.

Grundlegende Eigenschaften von Festkörperbatterien

Derzeit werden Lithium-Ionen-Zellen mit Flüssig- und Polymerelektrolyten verwendet, wobei es sich bei der überwiegenden Mehrheit um Flüssigelektrolyt-Zellen ohne metallisches Lithium handelt. Die Hauptunterschiede zwischen einer SSB und einer herkömmlichen Lithium-Ionen-Batterie (LIB) bestehen darin, dass der Separator und der flüssige Elektrolyt durch einen Festkörperelektrolyten ersetzt und Anoden mit höherer Kapazität verwendet werden.

Allgemein zielt die Entwicklung von Lithium-Ionen-Batteriezellen der nächsten Generation darauf ab, die Verwendung von metallischem Lithium zu ermöglichen, wodurch die Energiedichte erhöht werden soll. Da die Bildung von Dendriten und die ungleichmäßige Position der Lithium-Metall-Elektroden während des Ladevorgangs jedoch ein ernsthaftes Sicherheitsrisiko darstellen, werden außer-



Für SSB ist ein ausreichender Stapeldruck entscheidend, um den Kontakt zwischen den Zellkomponenten zu gewährleisten. Sehr hohe Stapeldrücke können jedoch aufgrund der Duktilität des Lithiummetalls, das durch die Poren des Festelektrolyten kriechen kann, zu Kurzschlüssen führen. Daher muss der Stapeldruck für jede Zellchemie optimiert werden, wobei für sulfidbasierte Elektrolyte ein Stapeldruck von etwa 50 atm angesetzt wurde.

In einem anderen Ansatz wird dem SSB eine kleine Menge Flüssigelektrolyt zugesetzt, um einen guten Kontakt mit den Komponenten des aktiven Kathodenmaterials aufrechtzuerhalten, wobei die Zelle bei niedrigeren Stapeldrücken arbeiten kann. Dieser Ansatz verringert jedoch die thermische Stabilität der Batterie im Vergleich zu All-solid-state Batterien (ASSB), die einen reinen Festelektrolyten verwenden.

Auf dem Weg von der konventionellen LIB zur ASSB, findet eine mehrstufige Evolution statt (Abbildung 1). Heutzutage verfolgt das Unternehmen ProLogium ebenfalls den zweiten Ansatz, bei dem der SSB eine geringe Menge an flüssigem Elektrolyten zugefügt wird, um als Hybridlösung mehr Sicherheit zu bieten. Mit dieser Strategie können große Zellen (>50 Ah) mit einem hohen Siliziumanteil (>20 Prozent) in der oxidbasierten Anode hergestellt werden. In der anschließenden optimierten Hybridstufe wird der Siliziumgehalt in Richtung reiner Siliziumanode erhöht, bis die Anode durch Lithiummetall ersetzt wird – bei gleichzeitiger Reduzierung der Dicke des Festkörperelektrolyten. Schließlich wird durch das Weglassen des flüssigen Elektrolyten die ASSB erreicht.

Ein Großteil der kommerziellen SSBs verwendet Polymer-, Sulfid- und Oxid-Elektrolyte. Wie oben beschrieben, kombiniert ProLogium Elektrolyte auf Oxidbasis mit einem hohen Siliziumgehalt oder einer Lithiumanode und ermöglicht so bis zu 280 Wh/kg im Jahr 2022 und >410 Wh/kg im Jahr 2025.

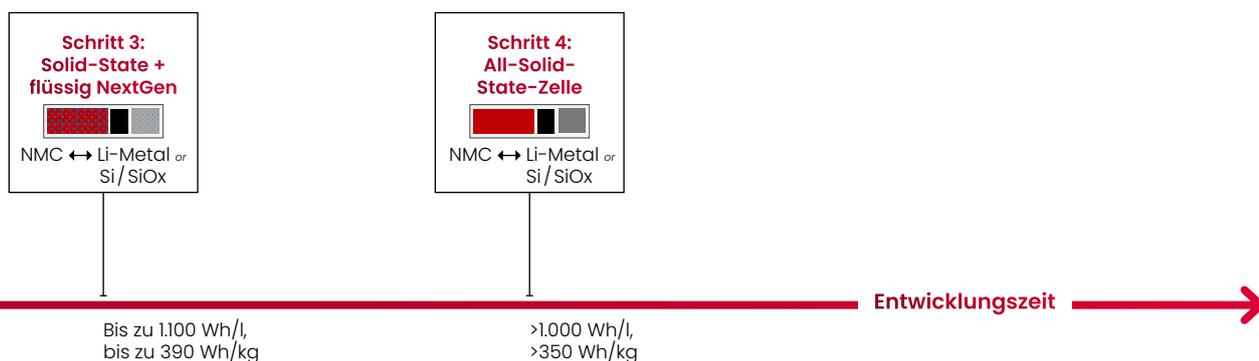
QuantumScape entwickelt einen keramischen Elektrolyten auf Oxidbasis in Kombination mit einem organischen Flüssigkatholyt (Elektrolyt auf der Kathodenseite zur Verbesserung der Grenzflächenwiderstände). Mit dieser Technologie sollen >400 Wh/kg erreicht werden.

Solid Power arbeitet derzeit an einer Lithium-Ionen-Pouchzelle mit einem sulfidbasierten keramischen Elektrolyten unter Verwendung einer siliziumhaltigen Anode und eines High-Ni-NMC. Das derzeitige Ziel sind 390 bis 440 Wh/kg auf Zellebene. SolidEnergy Systems, ein aus dem Massachusetts Institute of Technology (MIT) hervorgegangenes Spin-off, verfolgt einen Elektrolyten auf Keramikbasis in Verbindung mit einem flüssigen Katholyten, um eine Energiedichte von über 400 Wh/kg zu erreichen.

Wie zu erkennen ist, wird nicht ein einzelner technologischer Weg beschritten, sondern es bestehen viele verschiedene Ansätze. Obwohl viel Aktivität auf Laborebene stattfindet, bleibt die Herstellung eines Festelektrolyten mit niedrigen Impedanzen und Grenzflächenwiderständen, guter mechanischer Festigkeit und hoher Ionenleitfähigkeit zu niedrigen Kosten auf industriellem und wirtschaftlichem Niveau eine große Herausforderung. Dennoch zielen viele Ankündigungen von kleinen Start-ups bis hin zu großen Herstellern auf die zweite Hälfte dieses Jahrzehnts ab, so dass die Weichen für eine Solid-State-Revolution in der Batterieindustrie gestellt sind.

Batteriesystemdesign auf der Basis von Festkörperzellen

Im Anschluss an die Darstellung technischer Einblicke in die SSB-Technologie und Aktivitäten von Zellherstellern auf diesem Gebiet wird im nächsten Schritt ein Batteriesystem entworfen, das die besonderen Fähigkeiten und Bedürfnisse von Festkörperzellen berücksichtigt. Ziel ist es, die



Übertragbarkeit der Eigenschaften von der Zelle auf die Packebenen zu untersuchen. Hierzu wurden verschiedene Batteriekonzepte in einer typischen automobilrelevanten Größenordnung auf der Basis unterschiedlicher Zellformate und Layouts betrachtet, von denen der vielversprechendste Ansatz schließlich im weiteren Design verfolgt wird. Grundlage für die Betrachtungen ist dabei die bei ProLogium verfügbare Zelltechnologie mit 28 Prozent Silizium in der Anode und Flüssigelektrolytanteil mit 615 Wh/l.

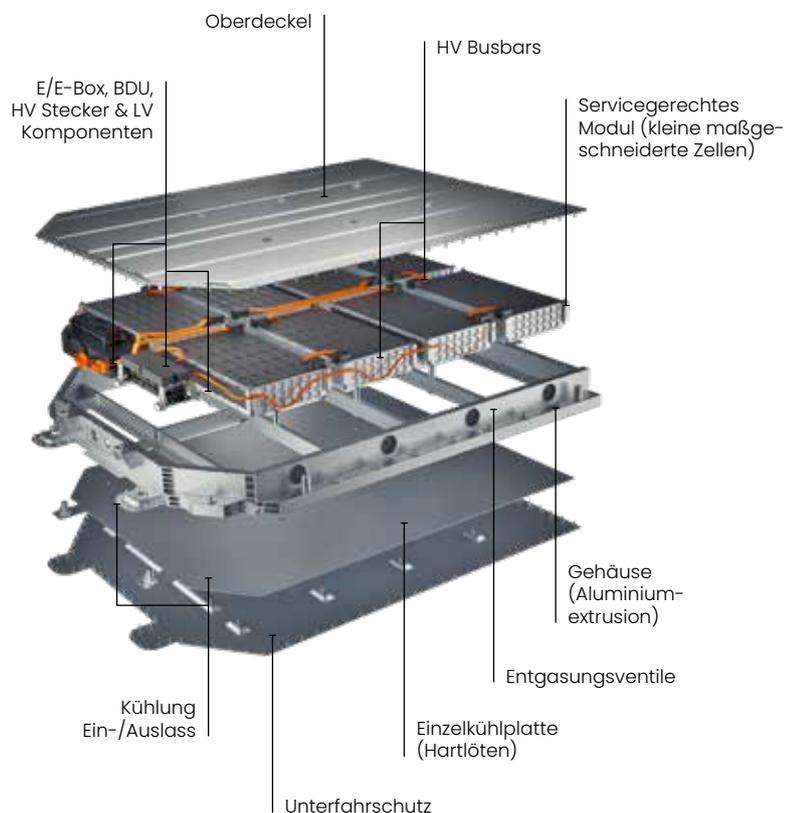
Um das Anschwellen der Zelle in Verbindung mit der Festkörpertechnologie besser zu beherrschen, wurde ein prismatisches Zellformat gewählt. Es werden theoretische Batteriezellen in selbst skalierten Formaten betrachtet, deren elektrische Eigenschaften von ihrer Prototypzelle als Referenz und dem Volumen des Elektrodenstapels als Proportionalitätsfaktor abgeleitet und mit ProLogium abgestimmt wurden. Die skalierte Zelle hat die Abmessungen 310x100x45 mm. Sie ist somit mit dem VDA-Standardmodul konform ist sowie der BEV2-Standarddicke folgt und weist seitliche Pole auf.

Auf der Grundlage der von ProLogium bereitgestellten Schwellendaten über die Lebensdauer und den Ladezustand wird der Abstand zwischen den Zellen entsprechend festgelegt. Auf Packebene sind die Designparameter, die die Struktursteifigkeit und die Luftspalte bestimmen, die sich auf die Crash-Eigenschaften auswirken, unabhängig von der Zellchemie und werden daher auf die Standardwerte für LIBs gesetzt. Gleiches gilt für die betrachteten Dimensionen der E/E-Komponenten, des BMS und des thermischen Systems. Insgesamt bietet ein Konzeptlayout mit 8 Zellstapeln in Querausrichtung viele Designvorteile in Bezug auf die strukturelle Steifigkeit des Gehäuses, die Verlegung der Busbars, die Entgasungspfade, die Komplexität der Zellstapel und das Kühlungsdesign, während gleichzeitig eine angemessene volumetrische Packungsdichte beibehalten wird. Durch die Verringerung der Komplexität des Zellstapels erreicht das entstandene Moduldesign eine Struktur

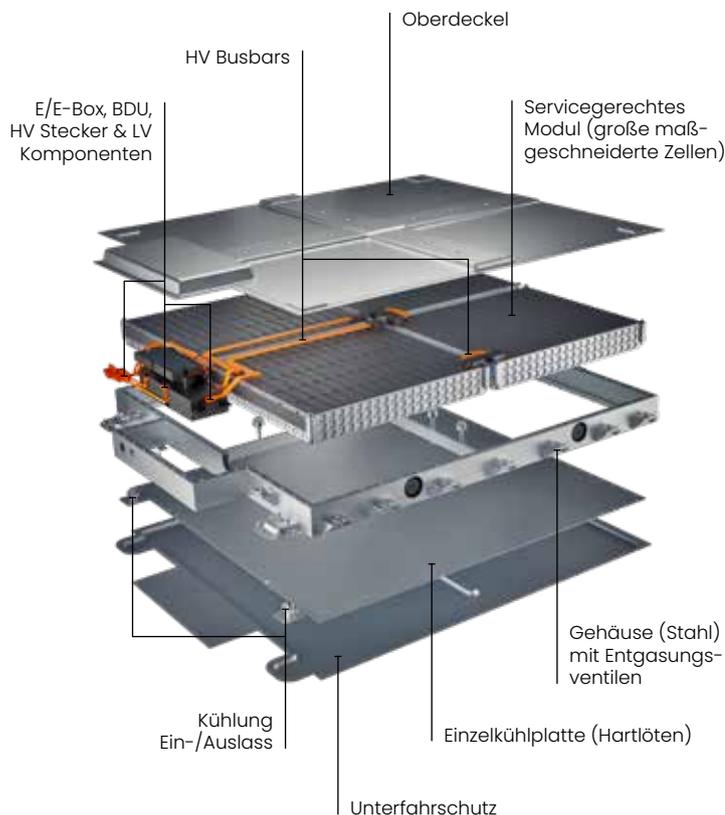
mit wenigen Komponenten, geringem Platzbedarf und niedrigem Gesamtgewicht. Die höhere thermische Sicherheit der SSB-Zellen ermöglicht ein dichteres Schweißen an den Zellen, was ein schlankeres Modul mit hoher struktureller Integrität erlaubt. Die Endplatten werden mit der Bodenplatte und den Seitenwänden verschweißt, wodurch ein struktureller Käfig für den vorkomprimierten Zellstapel entsteht. Jedes thermische Event innerhalb des Batteriesystems, das durch das thermische Durchgehen einer einzelnen Zelle verursacht wird, ist dank der geringeren Menge an flüssigem Elektrolyten weniger schwerwiegend als bei einer ähnlich großen konventionellen LIB. Dies verringert den Gesamtaufwand, der erforderlich ist, um das Batteriesystem vor thermischer Propagation (TP) zu schützen.

Das Design unterstützt die Verwendung einer Einzelkühlplatte für das Batteriepack. Dies reduziert nicht nur die Kosten, die Anzahl der Teile und das Gesamtgewicht des Systems, sondern auch den Platzbedarf der Kühlung, da keine Verbindung zwischen einzelnen Kühlplatten erforderlich ist. Abbildung 2 zeigt das Gesamtkonzept der Batterie, dessen Energiedichte von 215 Wh/l nach heutigen Maßstäben wettbewerbsfähig, aber nicht revolutionär ist.

Um das Potenzial für höhere Energiedichten zu demonstrieren, ist der nächste Schritt die Entwicklung eines optimierten Designs. Dies geschieht durch die Skalierung



2. SSB-Systemdesign nach dem aktuellen Stand der Technik



3. Optimiertes SSB-Systemdesign

TEXT

Florian Pampel
pampel_f@tme.rwth-aachen.de

Hendrik Löbberding
loebberding@fev.com

Moritz Teuber
teuber_m@fev.com

Tobias Klerks
klerks@fev.com

großer maßgeschneiderter Zellen und die Verwendung größerer, aber reduzierter Anzahl von Zellstapeln mit der damit verbundenen Verringerung von Luftspalten und einer schlanken Busbar-Verlegung. Anstelle eines Aluminiumgehäuses wird Stahl verwendet, was dünnere Gehäusewände und eine Verkleinerung der Querträger ermöglicht. Dank der höheren thermischen Sicherheit sind weniger TP-Maßnahmen mit einer Verkleinerung der Entgasungswege möglich. Mit dieser Strategie kann die Bauhöhe des Pakets um 11 Prozent reduziert werden. Drahtlose BMS-Slaves bieten weiteres Volumeneinsparpotential. Abbildung 3 zeigt das resultierende optimierte Pack, das mit insgesamt 4 Großmodulen und 96 großen Zellen in Serie eine Energiedichte von etwa 280 Wh/l bei einem servicegerechten Design erreicht. ProLogium hat eine kommende Generation mit einer Siliziumoxid-Anode für 2024 angekündigt. Sollte sie das identische Design aufweisen, wird eine signifikante Steigerung der Energiedichte auf 950 Wh/l im automobilen Zellmaßstab erwartet. Dies würde zu einer Energiedichte auf Packebene von rund 460 Wh/l führen.

Zusammenfassung und Ausblick

SSBs bieten das Potenzial, die für das Ende des Jahrzehnts erwarteten steigenden Reichweiten von batterieelektrischen Fahrzeugen zu realisieren. Die erreichte Energiedichte des erarbeiteten Batteriedesigns nach Stand der Technik ist nach heutigen Maßstäben wettbewerbsfähig, die Zelleigenschaften sind jedoch nicht revolutionär. Dennoch wurde das Design aufgrund des großen Potenzials der kommenden Generationen von ProLogium

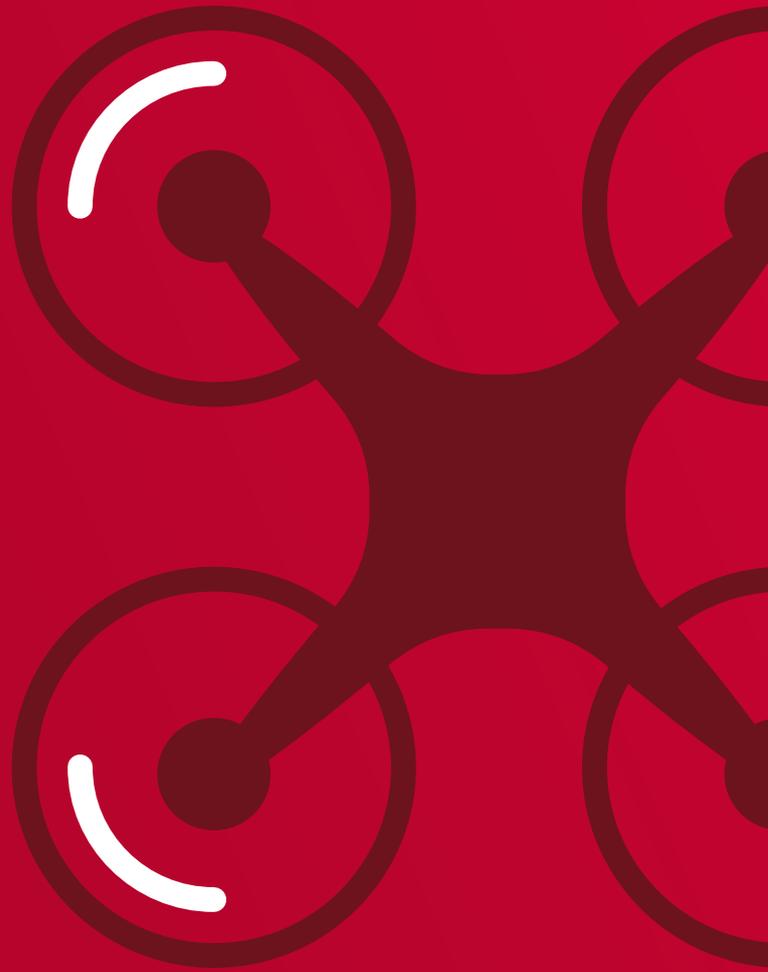
umgesetzt. FEV untersucht kontinuierlich neue und innovative Technologien, um deren wesentlichen Vorteile und Herausforderungen zu erkennen. Das Ziel ist die Entwicklung der klassenbesten Technologie für unsere Kunden mit einem tiefen technischen Verständnis. Dazu strebt FEV detaillierte Zelltests und den Bau eines Prototyps eines Festkörperbatteriepacks an, um das Potenzial zu bewerten. Unter der Voraussetzung, dass das Anschwellen in beherrschbaren Grenzen bleibt, ermöglicht das hohe Sicherheitsniveau der Zelle eine sehr dichte Packung, so dass wettbewerbsfähige Batteriesysteme auf Basis von Festkörperzellen gebaut werden können. Herausragende Eigenschaften können nur mit einem vollständig maßgeschneiderten und optimierten Designkonzept erreicht werden.

FEV kombiniert Begeisterung für Technologie mit tiefstem Verständnis für deren Perfektionierung. Wir entwickeln Ideen und Strategien, die unseren Kunden und Partnern den entscheidenden Vorsprung sichern.

Wir erforschen, hinterfragen, testen, lernen – und optimieren kontinuierlich unsere Lösungen und unsere Art der Zusammenarbeit. So entstehen bei FEV weltweit standardsetzende Innovationen in den Bereichen nachhaltige Mobilität, Energie und Software – für eine bessere Zukunft und mehr Lebensqualität für alle. Dieser Aufgabe haben wir uns verschrieben. Es ist spürbar – bei allem was wir tun.



FEV



#FeelEvolution

#6

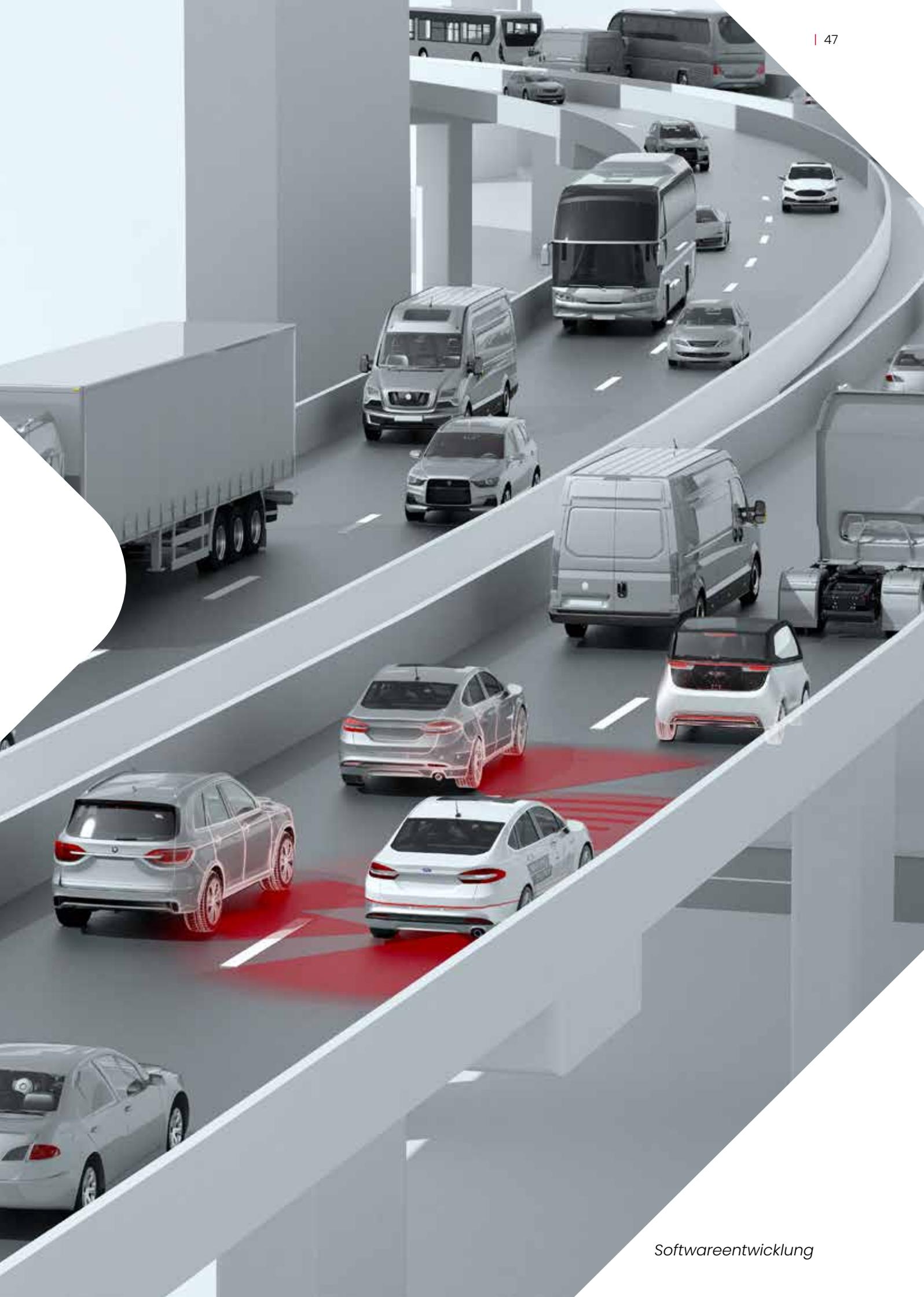
Softwaredefinierte

Fahrzeuge: Auswirkung auf F&E Organisationen und den Produktentwicklungsprozess

Seit seiner Erfindung vor mehr als 125 Jahren steht das Automobil vor dem größten Wandel seiner Geschichte. Die Herausforderungen des Klimawandels und technologische Errungenschaften verändern kontinuierlich die Spielregeln und eröffnen neue Geschäftsfelder. Plötzlich wird die Automobilindustrie für Softwareriesen wie Google, Apple oder Alibaba sowie für Telekommunikationsunternehmen wie Huawei interessant. Bis 2030 wird durch die Monetarisierung von Daten und den Verkauf neuer Softwarelösungen ein Umsatzpotenzial von mehr als 400 Milliarden Euro erwartet. Das Fahrzeug wird mit seiner Umgebung vernetzt sein und Konnektivität wird in Zukunft eine wichtige Rolle für hochautomatisiertes Fahren und weitere Mobilitäts- und Servicelösungen spielen. Mit einer Ausweitung des Softwareanteils im Fahrzeug können neue Mobilitätsfunktionen für ein hochgradig individuelles und verbessertes Fahrerlebnis angeboten werden.

Das Softwaredefinierte Fahrzeug (Software-defined vehicle, SDV) beschreibt den Trend zu einem Fahrzeug, das nicht mehr durch seine mechanischen Eigenschaften definiert ist (Abbildung 1). Vielmehr ist ein SDV ein Fahrzeug, dessen Eigenschaften und Funktionen auf moderner Fahrzeug-Hardware laufen, aber primär durch Software ermöglicht werden. Die Software trägt wesentlich zum Kundenerlebnis und zur Verbesserung der Fahrzeugeigenschaften und -funktionen bei. Das SDV spiegelt eine völlig neue Entwicklungsphilosophie wider und impliziert dadurch einen grundlegenden Wandel in der Art und Weise, wie Fahrzeuge in Zukunft entwickelt werden.





Entkopplung von Software und Hardware durch funktionsbasierte Entwicklung

Software- und Hardware-Entwicklung sind aufgrund fundamentaler Unterschiede im Hinblick auf Prozesse und organisatorische Aspekte schwer in Einklang zu bringen. Die traditionellen Akteure der Automobilindustrie müssen sich fragen, wie gut sie auf die Entwicklung von softwaredefinierten Fahrzeugen vorbereitet sind. Um die Automobilindustrie in ihrer Transformation hin zum softwaredefinierten Fahrzeug zu unterstützen, hat FEV Consulting ein Framework entwickelt, das alle Dimensionen einer professionellen F&E-Organisation abdeckt: das Produkt selbst, den Produktentwicklungsprozess, die Kompetenzen zur Ausführung der Prozesse und die Organisationsstruktur, um die Kompetenzen zu ermöglichen (Abbildung 2).

Software und Hardware werden seit jeher auf sehr unterschiedliche Weise entwickelt. Dies liegt unter anderem an den unterschiedlich hohen „Änderungskosten“. Während Revisionen in der Software sehr einfach zu bewerkstelligen sind, sind Änderungen an der Hardware im Entwicklungsprozess sehr kostenintensiv und mit langen Vorlaufzeiten verbunden. Um diese beiden Welten zusammenzubringen, hat FEV Consulting ein Konzept entwickelt, das auf dem typischen V-Modell basiert, und zugleich die Prinzipien der funktionsbasierten Entwicklung berücksichtigt. Das Konzept zeichnet sich durch drei Kernaspekte aus:

1. Maximale Entkopplung von Hardware- und Softwareentwicklung durch funktionsbasierte Entwicklung
2. Verkürzung der Gesamtentwicklungszeit durch weitgehende Parallelisierung von Aufgaben
3. Ausnutzen der OTA-Update-Möglichkeiten durch Post-SOP-Entwicklung

1. Entwicklung vom Hardware- zum Softwaredefinierten Fahrzeug

Konventionelles Fahrzeug

Differenzierung durch mechanische Merkmale wie Leistung und Drehmoment



Fahrzeugkonfiguration vor SOP definiert

Produkt primär durch Hardware definiert

Softwaredefiniertes Fahrzeug

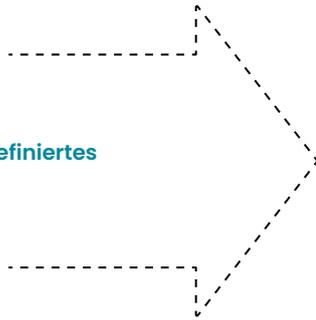
Differenzierung durch personalisierte softwarebezogene Dienstleistungen



Funktionen können nach SOP aktualisiert / hinzugefügt werden

Produkt primär durch Software definiert

Softwaredefiniertes Fahrzeug



Agile Produktentwicklung

- Feature-gesteuerte Entwicklung
- HW & SW synchronisiert
- FuSa, Cybersicherheit, A-Spice



2. Framework zur Entwicklung von softwaredefinierten Fahrzeugen

Effiziente Organisation

- Flexible Ressourcenzuweisung
- Interdisziplinäre Zusammenarbeit
- Befähigung der Teams

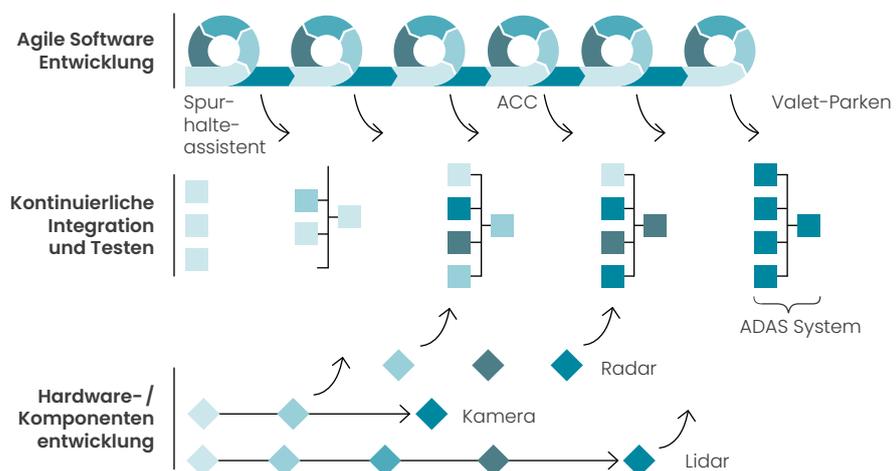
SW & HW Kompetenzen

- „Richtige“ Fachkräfte
- Software-Toolchain
- Entwicklungseinrichtungen

Am wichtigsten ist, dass die Perspektive auf die gesamte Systemarchitektur von komponentenbasiert zu funktionsbasiert geändert werden muss. Jede Funktion erfüllt eine bestimmte Gruppe von Kundenanforderungen. Daher müssen die Benutzeranforderungen mit den Funktionen verknüpft werden, die dann die nachfolgenden Anforderungen an Software und Hardware definieren. Nach dieser ersten Anforderungsdefinition können Hardware und Software theoretisch unabhängig voneinander entwickelt werden. Ziel ist es jedoch, eine erste Anforderungsdefinition zu formulieren, die während des gesamten Entwicklungsprozesses kontinuierlich aktualisiert werden kann.

Für den Erfolg eines Fahrzeugentwicklungsprojekts ist es entscheidend, genau zu überwachen, ob die entwickelten Produkte den definierten Anforderungen entsprechen, die Anforderungen regelmäßig zu hinterfragen und gegebenenfalls zu aktualisieren. Um ein frühzeitiges Testen von Software zu ermöglichen, müssen Hardwaresysteme bereits zu einem früheren Zeitpunkt des Prozesses für Tests verfügbar gemacht werden. Hierzu können z. B. Hardware der vorherigen Generation oder frühe Prototypen als Ersatz für die finale Hardware eingesetzt werden, bis diese verfügbar ist. Rapid-Prototyping-Methoden und die Simulation von Hardwarekomponenten unterstützen den Prozess zusätzlich.

3. Schema der funktionsbasierten Produktentwicklung



Neue Kompetenzen zur Steuerung von Softwareentwicklungsprozessen

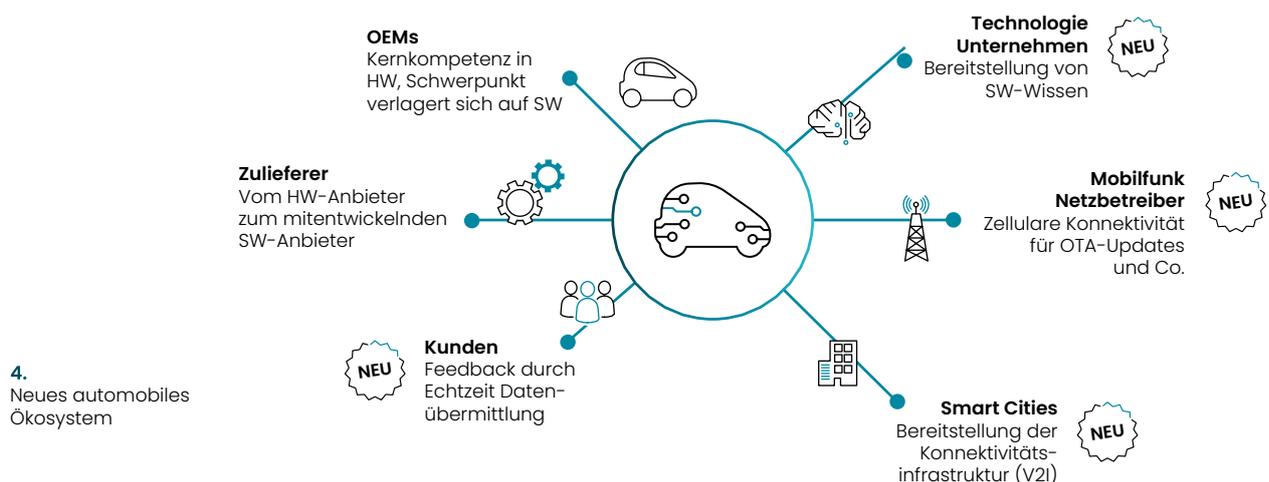
Die Softwareentwicklung erfordert eine ganze Reihe neuer Fähigkeiten: Hochleistungscomputer, Cloud- und Over-the-Air-Technologie, Softwarearchitekturentwicklung, Softwaredesign und -codierung, Softwaretests und virtuelle Fahrzeugentwicklung sind nur einige der neuen Produkt- und Entwicklungskompetenzen, die erforderlich sind. Darüber hinaus muss Prozesswissen aufgebaut werden, um (modellbasiertes) System-Engineering, agile Entwicklungsmethoden und Portfolio-Planung erfolgreich anzuwenden. Angesichts der Talent- und Ressourcenknappheit auf dem Markt ist es für OEMs sehr schwierig, diese Kompetenzen im Alleingang aufzubauen. Die richtige Mischung aus firmeninternen Fähigkeiten und Partnerschaften mit anderen Automobil- oder Wirtschaftspartnern ist ein entscheidender Erfolgsfaktor, um sich frühzeitig am Markt zu etablieren. Ein elementarer Schritt besteht darin, zu definieren, welche Technologien und Softwarefunktionen strategisch wichtig sind und für den Aufbau interner Kompetenzen priorisiert werden sollten.

Der Versuch der OEMs, aus digitalen Innovationen Kapital zu schlagen, kombiniert mit einer zunehmenden Systemkomplexität und einem ungedeckten Bedarf an Softwareexperten, verändert ihre Vision der automobilen Wertschöpfungskette drastisch. Die Automobilhersteller verstärken ihre Softwareentwicklungs- und -integrationskapazitäten, um die Befürchtung zu zerstreuen, auf einen Hardwareanbieter mit niedrigen Margen reduziert zu werden. Die größte Herausforderung ist jedoch der Aufbau der erforderlichen Fähigkeiten. Ihre Softwarekompetenz konzentriert sich traditionell auf die Entwicklung von Fahrzeuganwendungen in ausgewählten Bereichen

wie Antriebsstrang und ADAS. Softwaredefinierte Fahrzeuge erfordern jedoch eine durchgängige Software- und Hardwareplattform einschließlich eines starken Cloud-Backends. Lediglich Ressourcen aufzustocken, wird nicht zum Erfolg führen, da die erforderlichen Fachkräfte auf dem Markt nur begrenzt verfügbar sind. Um das Wertversprechen entlang des gesamten digitalen Fahrzeugs zu maximieren, müssen OEMs neue, vielfältigere Kooperationsmodelle in Betracht ziehen, welche über rein vertikale und etablierte Kunden-Lieferantenbeziehungen hinausreichen (Abbildung 4).

Software als Teil der gesamten Unternehmensstrategie

Eine der größten Herausforderungen für traditionelle OEMs im Hinblick auf die softwaredefinierte Fahrzeugentwicklung ist die bestehende hardwareorientierte Organisation. OEMs sind nach traditionellen Entwicklungsprozessen organisiert, einschließlich klar definierter Zuständigkeiten und hierarchischer Strukturen für Hardwaresysteme. Dieses Umfeld sieht die nahtlose Integration von effizient entwickelter und kontinuierlich eingebundener Software nicht vor. Reine Softwareunternehmen folgen einem anderen Entwicklungsablauf mit dezentralen Verantwortlichkeiten in agilen Teams, flachen Hierarchien und dem Austausch von Wissen in verschiedenen



Kompetenzzentren. Für die traditionellen Akteure der Automobilindustrie bedeutet dies nicht nur eine Veränderung der Prozesse, sondern auch eine radikale Veränderung der Unternehmenskultur. In der Vergangenheit waren die traditionellen OEMs stark in der Hardware-Entwicklung, so dass die Hardware immer Vorrang vor der Software hatte. Diese Denkweise spiegelt sich auch in klassischen Organisationsstrukturen wider, in der die Zuständigkeiten für die Software über das gesamte Unternehmen verteilt ist und verschiedene Abteilungen an ihrer eigenen Software arbeiten. Da die Software im gesamten Fahrzeug immer komplexer wird, wird eine Standardisierung und Zentralisierung bestimmter Softwarefunktionen immer wichtiger. Viele OEMs haben dies bereits erkannt und ihre Softwareentwicklungsabteilungen in Richtung eines zentraleren Ansatzes umstrukturiert. Während jeder spezifische Fall individuell bewertet werden muss, bietet eine Zentralisierung von Softwarekompetenzen – intern oder als separates Spin-off – mehrere Vorteile gegenüber einer Verteilung der Kompetenzen über die gesamte Organisation (Abbildung 5).



	über die Organisation verteilte SW-Ressourcen	SW-Ressourcen ganz oder teilweise in 1 oder mehreren Abteilungen zentralisiert	SW-Ressourcen ganz oder teilweise in eine separate Organisation verlagert
Implementierungsaufwand	○○○	○○○	○○○
Sichtbarkeit und Ermächtigung	○○○	○○○	○○○
Operative Freiheit (z. B. IT, Kultur, Tools, Personaleinstellungen ...)	○○○	○○○	○○○
Zentrale SW Strategie & -Governance	○○○	○○○	○○○
Attraktivität für SW-Talente	○○○	○○○	○○○
Verbindung zu F&E/Hardware	○○○	○○○	○○○

5. Software-Integration in die Organisationsstruktur

Organisatorischer Wandel muss richtig durchgeführt werden

Der Trend zu softwaredefinierten Fahrzeugen ist eine Chance, da er neue Umsatzpotenziale und Möglichkeiten zur weiteren Verbesserung des Produktangebots für den Kunden mit sich bringt. Für die Entwicklung von SDVs ist jedoch organisatorische Exzellenz in allen Dimensionen einer professionellen F&E-Organisation erforderlich. Um die Umstellung erfolgreich zu bewältigen, ist das volle Engagement des Managements für den gesamten Prozess und die Bereitschaft, die wichtigsten Hindernisse zu überwinden, entscheidend. In Bezug auf die Prozesse besteht der wichtigste Erfolgsfaktor darin, einen Rahmen zu schaffen, in dem die Softwareentwicklungsteams genügend Freiraum haben, um agil und flexibel zu arbeiten und gleichzeitig die geforderten Meilensteine bei der Fahrzeugentwicklung einzuhalten. Die richtige Mischung aus internen Fähigkeiten und Partnerschaften mit anderen Akteuren aus dem Automobil- oder Nicht-Automobilbereich ist erforderlich, um frühzeitig auf dem Markt Fuß zu fassen. Die Organisationsstruktur muss die richtigen Grenzen schaffen, um nicht nur die Bedeutung von Software und einer veränderten Entwicklungsmentalität innerhalb der Organisation anzuerkennen, sondern auch die Bedürfnisse der verschiedenen Interessengruppen auszugleichen. Eine agile Entwicklungsumgebung mit funktionsübergreifenden Teams ist die Grundlage für eine hohe Frequenz beim Ausrollen von neuen Softwarefunktionen.

TEXT
 Mirko Engelhard
 engelhard_m@fev.com
 Markus Volkening
 volkening_ma@fev.com
 FEV Consulting

EURO



#7

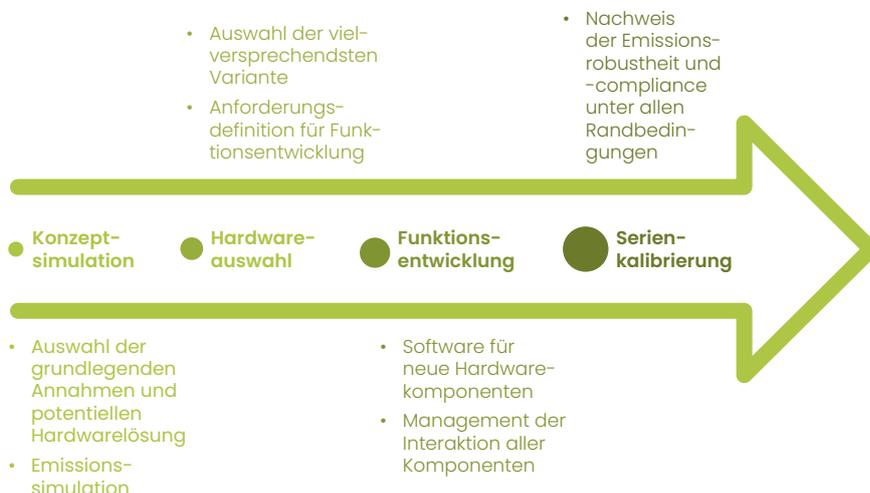
FEVs fortschrittliche Hardware-, Steuerungs-, und Kalibrierlösungen für **EURO 7**

Die Einführung der Abgasgesetzgebung EURO 7 zielt auf ultraniedrige Emissionen unter allen Betriebsbedingungen ab. Dies wird durch die Einführung sehr strenger Emissionsgrenzwerte, breitere Randbedingungen, aber auch durch die Einführung von Grenzwerten für bisher nicht reglementierte Emissionsspezies wie N₂O erreicht.

Neben der quantitativen und qualitativen Verschärfung der Emissionsgrenzwerte wird auch die In-Use-Compliance verschärft. Die Grenzwerte gelten für die meisten Fahrscenarien und werden online im Fahrzeug überwacht, was einen neuen Diagnoseansatz namens OBM (On-Board Monitoring) erfordert.

Um die neuen Grenzwerte einzuhalten und die geforderte Robustheit zu gewährleisten, werden neue Hardwarekomponenten und Steuerungen benötigt. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, bietet FEV einen ganzheitlichen Ansatz (Abbildung 1). Ausgehend von einer Konzeptsimulation kann die vielversprechendste Hardware ausgewählt und potenzielle Robustheitsrisiken identifiziert werden. Durch die langjährige Erfahrung von FEV in der Funktionsentwicklung können neue Steuerungslogiken auf die neue Hardware zugeschnitten werden. Aufgrund der Zusammenarbeit von FEV mit zahlreichen unterschiedlichen Hardwarelieferanten kann eine frühe Demonstration der Hardware- und Softwarelösungen realisiert werden. Das Ergebnis ist eine leistungsstarke Kombination aus Hardware und Steuerlogik, die eine robuste und effiziente Kalibrierung für die Produktion ermöglicht.

1. Ganzheitlicher FEV Produktentwicklungsansatz





Konzeptsimulation

Die Entwicklung modernster Antriebsstränge erfordert spezifische, zielgerichtete Entwicklungsmethoden. FEV hat umfangreiche patentierte und zum Patent angemeldete Entwicklungsmethoden im Bereich Simulation, Prüfung und Alterung von emissionsrelevanten Komponenten entwickelt. Diese erlauben bereits in einem frühen Entwicklungsstadium eine hohe Robustheit und Prognosegenauigkeit. Abbildung 2 gibt einen Überblick über die simulationsfokussierte Optimierungsmethode, die für die Konzeptentwicklung verwendet wird.

Die Emissionssimulation ist eine wesentliche Säule im Frontloading der Entwicklung. Sowohl die Teilmodelle als auch deren Parametrierung werden kontinuierlich weiterentwickelt, wobei die Echtzeitfähigkeit ihren Einsatz im Rahmen der virtuellen Kalibrierung mittels Hardware-in-the-Loop ermöglicht.

Um unterschiedlichste Antriebsstränge in verschiedenen Fahrzyklen zu simulieren, kann in der Softwareumgebung GT-Suite® ein modularer Simulationsmodellbaukasten eingesetzt werden. Damit lassen sich Variationen des Antriebsstrangs und der Betriebsstrategien in unterschiedlichen Detaillierungsgraden modellieren.



2. Simulative Optimierungsmethode zur Erfüllung von Emissionscompliance

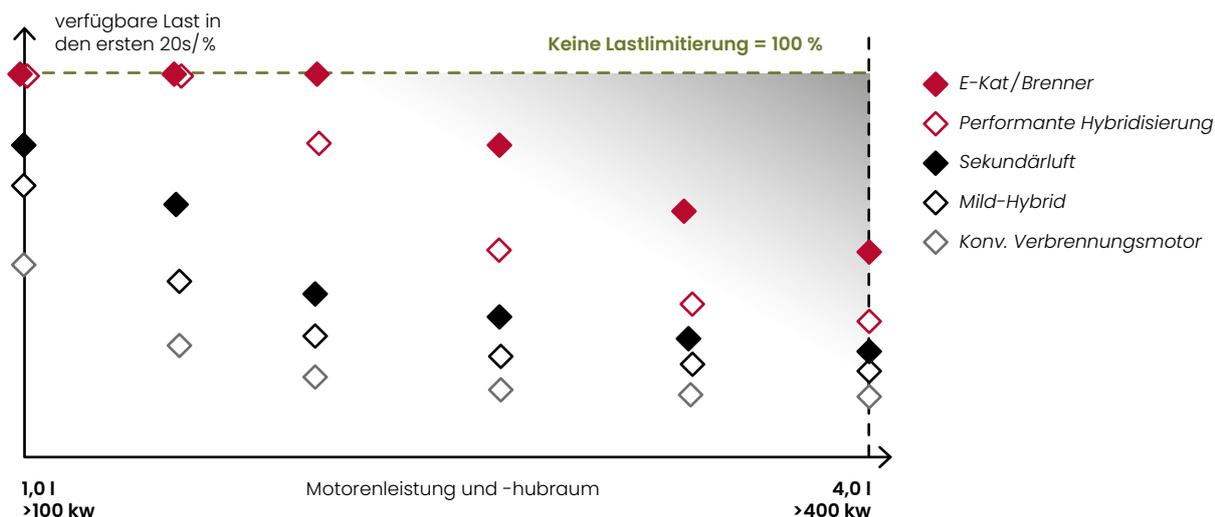
Die Modellierung der Motorrohmissionen basiert auf stationären und transienten Messdaten von Motor- und Rollenprüfständen. Dies geschieht unter standardisierten Randbedingungen, d. h. bei niedrigen und warmen Kühlmittel- und Öltemperaturen und optimierten Verbrennungsparametern.

Das Simulationsmodell für die Abgasnachbehandlung basiert auf einem kennfeldbasierten Ansatz. Eine äquidistante Diskretisierung des beschichteten Monolithen erlaubt eine Abbildung des Aufwärmverhaltens entlang seiner Längsachse zur Berücksichtigung individueller, temperaturabhängiger Umsatzraten.

Die wesentlichen Einflussfaktoren für die Umwandlungseffizienzen bei gegebener Katalysatorformulierung sind die Raumgeschwindigkeit (SV), die Temperatur (T) des jeweiligen diskretisierten Teilvolumens, das rel. Luft/Kraftstoff-Verhältnis (λ) im Abgas und die Menge an gespeichertem Sauerstoff für Drei-Wege-Katalysatoren. Besonders wichtig für die Ermittlung der Emissionen ist eine genaue Darstellung des Warmlaufverhaltens der Abgasnachbehandlung und eine Ableitung des Einflusses auf die Schadstoffumsetzung. Insbesondere während der Katalysatoraufheizphase und der ersten Lastanforderung in dieser Zeit sind starke Temperaturgradienten im Katalysator und damit eine deutliche Änderung der Rohmissionsumsetzung zu beobachten. Bei der Schadstoffumwandlung ist nur der aktive Teil des Katalysators wirksam. Dieser Effekt erhöht die effektive Raumgeschwindigkeit während der Kaltstartphase und die Umwandlungswirkungsgrade sind entsprechend gering.

Ein wesentlicher Bestandteil einer präzisen Emissionssimulation ist die korrekte Modellierung der Abgasnachbehandlungskomponenten. Bei der Entwicklung der RDE-Emissionssimulationsmethodik wurde festgestellt, dass Drei-Wege-Katalysatoren anfänglich nur selten mit ausreichender Genauigkeit modelliert werden konnten. Der Grund dafür liegt in den meist begrenzt verfügbaren Messdaten von Katalysatorherstellern und OEMs. Für eine genaue Vorhersage der Emissionen unter RDE-Randbedingungen ist die Kenntnis der Umsatzrate bei höchsten Raumgeschwindigkeiten und in einem weiten Temperaturbereich von Interesse. Aus diesem Grund hat FEV einen speziellen Prüfstand entwickelt, mit dem Katalysatoren unter diesen Bedingungen charakterisiert werden können.

»Aufgrund der Zusammenarbeit von FEV mit zahlreichen unterschiedlichen Hardwarelieferanten kann eine frühe Demonstration der Hardware- und Softwarelösungen realisiert werden.«



3. Einfluss auf Leistungslimitierung nach Kaltstart in Abhängigkeit von Motorgröße und Technologiepaket für mittleren SUV (Ottomotor)

Technologieupdates für EURO 7

Obwohl die genauen Randbedingungen für EURO 7 noch definiert werden müssen, kann bereits heute von einer Reihe von Technologie-Updates ausgegangen werden. EURO 7 wird einerseits aggressivere Kaltstartanforderungen und andererseits eine deutliche Erweiterung des Betriebsbereichs mit verbindlichen gesetzlichen Grenzwerten vorantreiben. Während letzteres durch erhöhte Katalysatorvolumina und optimierte Verbrennungsparameter einschließlich Lambda = 1 für Benzinmotoren im gesamten Motorkennfeld realisiert werden kann, wird die Kaltstartanforderung eine Kombination aus neuer Hardware sowie Steuerung vorantreiben. Als Hardware wird eine Vorrichtung zum schnellen Aufheizen benötigt. Dies kann durch einen elektrisch beheizten Katalysator (48 V) oder einen Abgasbrenner realisiert werden. Regelungsseitig sollte eine gewisse Drehmomentbegrenzung oder ein elektrisches Anfahren (Hybridelektrofahrzeug, HEV) berücksichtigt werden. Die Regelstrategie ist stark abhängig von der verbauten Hardware und Anwendung. Das qualitative Ergebnis einer Konzeptstudie für ein Mittelklasse-SUV mit Benzin-Antriebsstrang und unterschiedlichen Technologiepaketen ist in Abbildung 3 dargestellt.

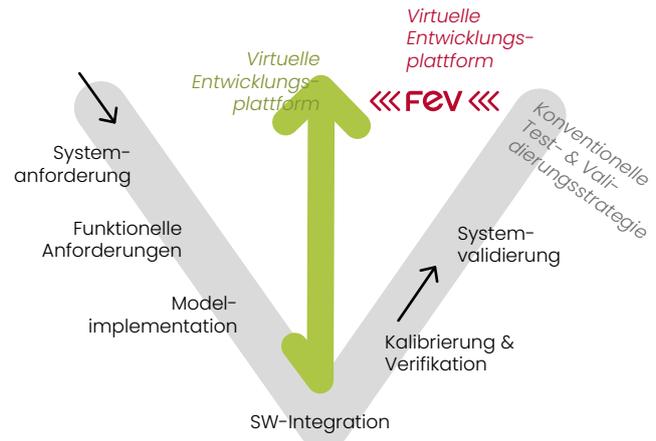
Während bei kleinen und mittelgroßen Motoren ein elektrisch beheizter Katalysator und eine starke Hybridisierung in der Lage sind, jeglichen Leistungsverlust zu vermeiden, können bei herkömmlichen Motoren ohne bzw. mit geringer Hybridisierung in der anfänglichen Kaltstartphase erhebliche Leistungsreduzierungen auftreten.

Funktionsentwicklung und Kalibrierung

Die für EURO 7 erwarteten extrem hohen Anforderungen an die Emissionsrobustheit treiben – neben leistungsfähigerer Hardware – komplexe Software- und Kalibrierungslösungen.

Abbildung 4 zeigt den Funktionsentwicklungsprozess von FEV. Ausgehend von den im Konzept definierten Systemanforderungen werden die Anforderungen für jede Funktion und die gesamte Software in einem V-Zyklus-Ansatz spezifiziert. Unter Berücksichtigung der gestiegenen Robustheitsanforderungen und des allgemeinen Trends zu kürzeren Entwicklungszyklen, nutzt der rechte Pfad umfassende Virtualisierung, einschließlich fortschrittlicher Hardware-in-the-Loop (HiL)-Simulation.

4. FEV Funktionsentwicklungsprozess für EURO 7



Als konkretes Beispiel für diesen Prozess wird in diesem Artikel die Softwareentwicklung zum Betrieb eines elektrisch beheizten Katalysators (EHC) demonstriert. Sobald die Hardware des Motors und des Nachbehandlungssystems definiert ist, wird die Steuerlogik entsprechend angepasst. Dabei muss einerseits die Ansteuerung neuer Geräte adressiert werden, andererseits muss das Zusammenspiel des Gesamtsystems betrachtet werden.

FEV hat eine modulare Funktionsbibliothek für die Antriebsstrangsteuerung entwickelt. Basis dieser Bibliothek ist eine durchgängige Softwarearchitektur, die Funktionen nach physikalischen Schnittstellen gruppiert, und ein Entwicklungsframework, das die Funktions- und Softwareentwicklung vom Prototyp bis zur Serienreife unterstützt.

Die Bibliothek wird kontinuierlich erweitert, basierend auf neuen Anforderungen und Technologien, die für EURO 7 eingeführt werden. Die Funktionen sind größtenteils modellbasiert, um ultraniedrige Emissionen unter allen Betriebsbedingungen zu erreichen. Das optimale Zusammenspiel verschiedener Teilsysteme wird durch intelligente Systemkoordinatoren sichergestellt. Abbildung 5 zeigt die Kernfunktionalitäten eines elektrisch beheizten Katalysators als Beispiel für eine solche Bibliotheksfunktion.

Die Entwicklung dieser Funktionen beginnt idealerweise parallel zur Konzeptsimulation. Die Konzeptsimulationsumgebung dient als virtuelle Test- und Applikationsplattform, bevor der erste Prototyp verfügbar ist. Zudem kann der Test- und Applikationsaufwand mit Testfahrzeugen in späteren Entwicklungsphasen reduziert werden.

Das Entwicklungsframework ermöglicht ein Deployment der Funktionen entweder auf Rapid-Prototyping oder dem finalen Zielsteuergerät.

FEV EURO-7-Funktions-Entwicklungsprozess

- Funktionsentwicklung startet parallel zu Konzeptbewegung und basiert stark auf virtuellen Testplattformen:
 - Funktionen werden unter EURO-7-relevanten Bedingungen getestet bevor erste Prototypen verfügbar sind
 - Funktionen werden kontinuierlich unter allen EURO-7-Bedingungen auf der virtuellen Testplattform getestet
- > *Erhöhte Reife und reduzierter Entwicklungsaufwand verglichen mit konventionellen Test- und Validierungsstrategien*

Performance bei Straßenmessungen

Nach der Kalibrierung der Softwarefunktionen sollte das Potenzial des neu entwickelten Abgassystems in Fahrversuchen ermittelt werden.

Dazu wurde eine neu konzipierte Abgasanlage in den FEV Heavy Duty Demonstrator eingebaut.

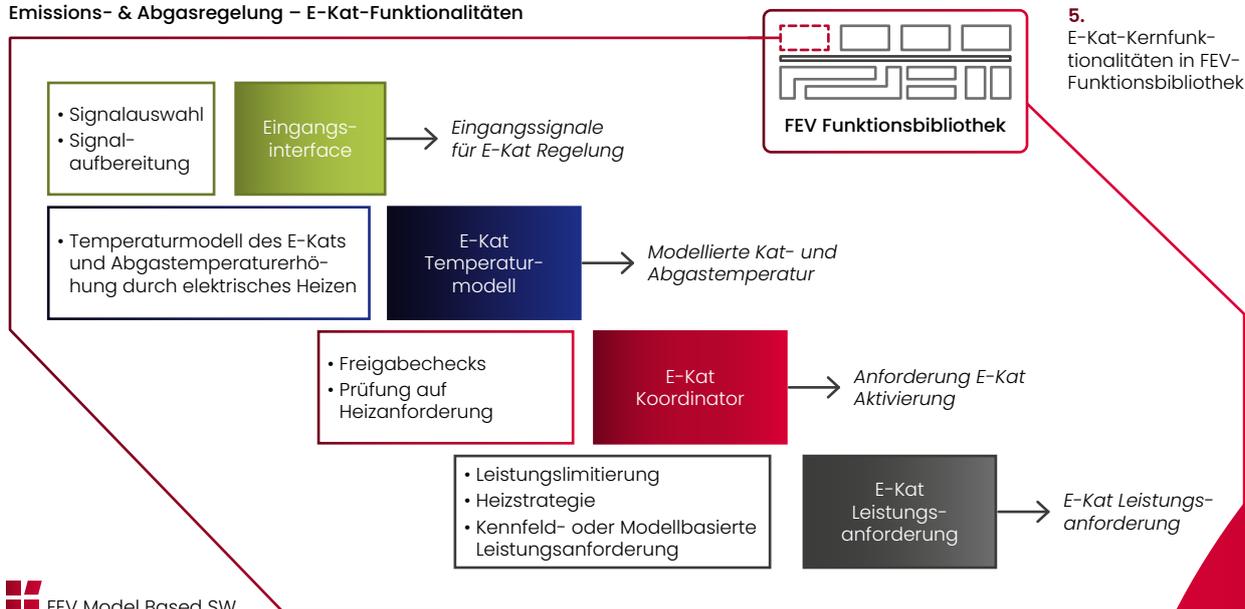
Die neue Steuerungssoftware wurde auf einem Rapid-Prototyping-Steuergerät bereitgestellt, das parallel zum Motorsteuerungssystem verwendet wurde. Über die Software-schnittstellen werden benötigte Eingangsgrößen aus unterschiedlichen Quellen in die Steuerung eingespeist oder einzelne Aktuatoren wie die AdBlue-Dosierventile angesteuert. Ein 10 kW-EHC und der DOC (Dieseloxidationskatalysator) sind direkt am Turbinenausgang montiert, während der erste SCR/ccSCR (Selective Catalytic Reduction Catalyst, Katalysator für selektive katalytische Reduktion, motornah) gefolgt von einem DPF (Dieselpartikelfilter) und einem zweiten SCR, die sich in der Nachbehandlungsbox befinden.

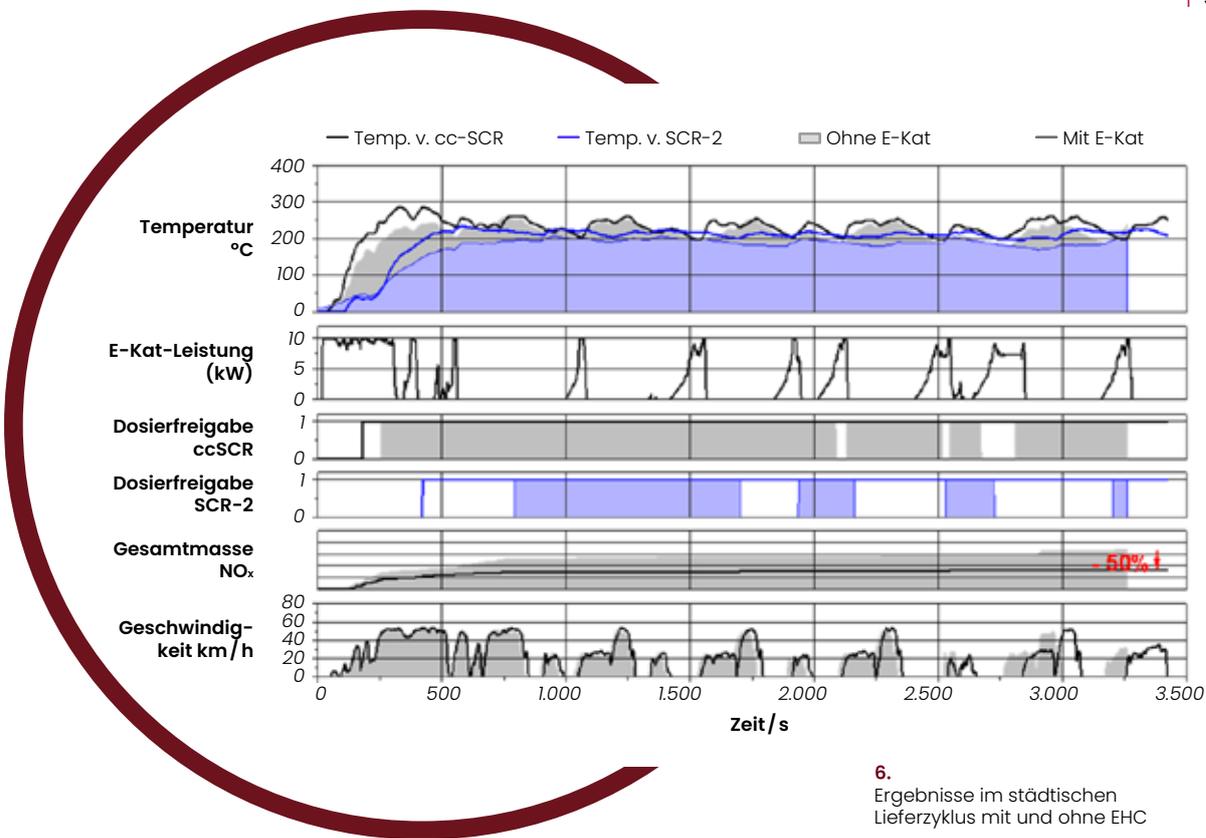
Es wurden verschiedene Tests durchgeführt. Als Beispiel ist hier ein städtischer Lieferzyklus abgebildet. Dieser Test beginnt mit einer 15-minütigen Fahrt im städtischen Bereich. Danach folgen insgesamt neun simulierte Zustellstopps (dreimal 1, 2 oder 3 Minuten). Während dieser Stopps läuft der Motor weiter im Leerlauf. Zwischen den Stopps folgen kurze Fahrten unterschiedlicher Dauer von ca. 1 bis 4 Minuten. Besonderes Augenmerk liegt bei dieser Art von Tests neben der Warmlaufphase nach dem Kaltstart auf der möglichen Abkühlung der Abgasanlage während der Stoppphasen.

Zur besseren Vergleichbarkeit und zur Definition eines Worst-Case wurden alle Tests bei kaltem Motor und leerem NH₃-Speicher der SCR-Systeme gestartet. Ziel der Tests war es, die Leistungsfähigkeit des neuen Abgasnachbehandlungssystems zu demonstrieren, insbesondere den durch den EHC zu erzielenden Nutzen. Aus diesem Grund wurden alle Tests jeweils einmal mit aktivem und nicht aktivem EHC durchgeführt. Abbildung 6 zeigt einen Vergleich der Ergebnisse der beiden Testläufe.

Nach dem Motorstart kommt es zu einer direkten Ansteuerung des EHC und dadurch zu einer Erhöhung des Temperaturniveaus vor den beiden SCR um bis zu 60 °C. Daraus ergibt sich ein früherer Dosierbeginn von ca. 77 Sekunden für das erste und ca. 370 Sekunden für das zweite AdBlue®-Dosierventil.

Emissions- & Abgasregelung – E-Kat-Funktionalitäten





Die Stoppphasen führen zu einer Abkühlung der Abgasanlage. Bei einem System ohne EHC führt dies zu einem Verlust der Dosierfreigabe beider Dosierventile, was zu NO_x-Durchbrüchen führt. Beim Test mit aktivem EHC wird dieser beim Unterschreiten einer vorkalibrierten Schwelle wieder aktiviert und verhindert ein zu starkes Absinken der Temperatur. Die Dosierung an beiden AdBlue-Ventilen bleibt während des gesamten Testzeitraums aktiv.

Auf diese Weise kann für den gesamten Test eine Reduzierung der NO_x-Emissionen um etwa 50 Prozent erreicht werden. Dem steht ein elektrischer Energieeinsatz von etwa 2,19 kWh gegenüber, wovon etwa 0,9 kWh während der Kaltstartphase in den ersten 600 Sekunden anfallen.

TEXT

Dr. Patrick Recker
recker@fev.com
Dr. Christoph Menne
menne_c@fev.com

Zusammenfassung

Der ganzheitliche FEV Ansatz für EURO 7, beginnend mit fortschrittlicher Konzeptsimulation bis hin zur dedizierten Funktionsentwicklung und Kalibrierung, liefert eine ideale Grundlage für das Erreichen der zukünftigen EURO 7-Gesetzgebung.

Wir zeigen nicht nur,
wie es aussieht, wir
erklären auch, warum!



feel evolution



Performance
Benchmarking



Design
Benchmarking



Cost
Benchmarking



Academy &
Innovation lab



Benchmark
Database

Aktuelle Benchmark Programme

- ▶ Toyota bz4x
- ▶ Rivian R1T
- ▶ Lucid Air Dream Edition
- ▶ Hyundai Ioniq 5
- ▶ BYD Qin Plus DM-i
- ▶ Toyota Mirai 2
- ▶ Porsche Taycan Turbo S

FEV verfügt über eine breite Palette an Fahrzeug- und Systemprüfständen zur Messung von Leistungsdaten. Neueste Fahrzeugmodelle und Antriebssysteme werden zum Beispiel im Hinblick auf Energieverbrauch, Effizienz, Betriebsstrategien und Akustik untersucht. Die detaillierte Zerlegung und Kostenbewertung der Bauteile geben Aufschluss über technische Merkmale und Kostenstruktur. In Workshops mit unseren Kunden identifizieren wir neue Design- und Kostensenkungsideoen und suchen nach neuen Geschäftsmöglichkeiten.

**Besuchen
Sie unseren
Webshop:**



benchmarking.fev.com

#8

FEV Zero CO₂ *Mobility* Conference 2022

Elektroautos liefern positiven Beitrag

Die Teilnehmer:innen der erneut hochkarätig besetzten internationalen FEV Fachkonferenz „Zero CO₂ Mobility“ Ende 2022 waren sich einig, dass das 1,5-Grad-Ziel des Pariser Klimaschutzabkommens im Transportsektor mit den bislang eingeleiteten Maßnahmen nicht mehr zu erreichen ist. Als Konsequenz wurden weiter verschärfte Regelungen zum Ausstieg aus fossilen Energieträgern bis hin zum Verbot fossiler Kraftstoffe diskutiert. Gleichzeitig plädierten die internationalen Expert:innen in Aachen für die parallele Verfolgung und Förderung aller technologischen Alternativen aus erneuerbaren Energiequellen für eine nachhaltige Mobilität – vom E-Fahrzeug über den Einsatz von grünem Wasserstoff in Brennstoffzellen und Verbrennungsmotoren bis zu E-Fuels für die Bestandsflotte.

In einer Online-Umfrage spiegelte sich die Überzeugung der mehr als 100 teilnehmenden Expert:innen wider: 93 Prozent gaben an, dass die globale Erwärmung bis 2050 bei mehr als +1,5 Grad liegen würde, ein Drittel davon sagte sogar, dass sie von mehr als +2,5 Grad ausgehen. Umso wichtiger sei es, jetzt endlich eine schnellstmögliche Abkehr von allen fossilen Energieträgern im Transportsektor voranzutreiben – und zwar mit maximalem Einsatz.

Gastgeber Dr. Norbert W. Alt, COO der FEV Group, bewertete bei seiner Begrüßung die Entwicklung der Elektromobilität weltweit als positiv, so werden in Deutschland inzwischen mehr E-Autos als Neuwagen mit Dieselmotoren verkauft. Doch werde sich die damit verbundene CO₂-Reduktion wegen der weltweiten Bestandsflotte

von rund 1,4 Mrd. Pkw und leichten Nfz erst ab 2040 und danach signifikant bemerkbar machen. Aus diesem Grund sei es wichtig, neben der Elektromobilität alle technologischen Lösungen wie Wasserstoff in Brennstoffzellen sowie in Verbrennungsmotoren und zusätzlich große Mengen nachhaltiger Kraftstoffe für die Bestandsflotte umgehend und parallel zu verfolgen. Dabei seien die häufig geführten Diskussionen über die Effizienz in der Erzeugung nicht fossiler Energieträger irreführend. Demnach habe die Welt kein Energieproblem, da bereits etwa 60 Minuten Sonnenenergie für den globalen Jahresenergiebedarf ausreichen.

Im Fokus: Wasserstoff

Auf dem Weg zur Defossilisierung wird grüner Wasserstoff als der zentrale potenzielle Energieträger der Zukunft bewertet. Die EU hat erst vor kurzem 5,2 Milliarden Euro für die Unterstützung von insgesamt 35 Wasserstoffprojekten freigegeben, flankiert von sieben weiteren Milliarden aus privaten Investitionsquellen. Bei der Konferenz in Aachen ging es um die gegenwärtigen Herausforderungen im Umgang mit Wasserstoff, gasförmig oder flüssig, klimaneutrale Erzeugung, Transport, Lagerung, Verteilung und Infrastruktur. So setzen aufgrund der hohen Effizienz und Reichweiten bei kurzen Tankzeiten vor allem schwere Nutzfahrzeuge im Langstreckenverkehr, diverse Offroad Anwendungen, die Bahn und nicht zuletzt die Luftfahrt auf Wasserstoffanwendungen und Brennstoffzellenantriebe.

Ganz konkret stellte Linde Engineering darüber hinaus seine drei Hauptziele beim Handling und Transport von flüssigem Wasserstoff vor: die Reduzierung des Eigengewichts von Verteileranlagen und Transportmitteln durch den Einsatz von Aluminium oder Composites, die Verbesserung der Wertschöpfungskette durch kürzere Betonungszeiten der Transportmittel und weniger Verluste durch hocheffiziente Pumpsysteme.





Hier weitere
Infos zum
Thema!

Als einer der weltweit führenden E-Fuels-Erzeuger berichtete zudem HIF Global über die Inbetriebnahme seines Standorts in Patagonien, Chile. Dort wird mit Hilfe grüner Energie aus einer Windturbinen und recyceltem CO₂ grüner Wasserstoff hergestellt und mit höchster Effizienz zu E-Methanol, E-Fuels und anderen synthetischen Kraftstoffen verarbeitet. Das Unternehmen plant mit Lieferkapazitäten von jährlich 750.000 Litern E-Methanol ab 2023, mehr als 55 Mio. Litern E-Fuels ab 2026 und mehr als 550 Mio. Litern E-Fuels ab 2028. HIF Global hat sich zum Ziel gesetzt, den Transport- und Mobilitätssektor weiter zu dekarbonisieren und die Wasserstoffwirtschaft auf nachhaltige, wettbewerbsfähige und sichere Art und Weise erheblich zu beschleunigen.

Audi geht bezüglich der Windenergieanlage von einem Gesamtwirkungsgrad von 74 Prozent und somit einem nahezu gleichen Wert wie bei der Erzeugung von fossilem Benzin aus.

Elektromobilität weiter auf dem Vormarsch

Deutliche Signale für den technologischen Wandel gehen zudem von der eMobilität aus. Die globale Verfügbarkeit von BEVs (Battery Electric Vehicles) hat deutlich zugenommen, die extrem hohe Effizienz des Elektroantriebs ist konkurrenzlos und wird daher als die hauptsächlich zum Einsatz kommende Antriebstechnologie der Zukunft im Pkw und zunehmend auch für Lkw-Anwendungen bewertet. Das zeigt sich auch an der Bereitschaft und dem Erfolg von Automobilherstellern, eigene Ikonen konsequent zu elektrifizieren: In Aachen zeichnete Volkswagen den Weg vom legendären Kultobjekt Bulli zum vollelektrischen ID.Buzz nach, der im Rahmen des Dekarbonisierungsprogramms der erste CO₂-neutral produzierte Volkswagen ist und ohne den vielzitierten CO₂-Rucksack an Kunden übergeben wird.

Der indische Hersteller Mahindra skizzierte bei der FEV Konferenz die politischen Stellhebel auf einem Volumenmarkt wie Indien: Mit gezielter staatlicher Förderung, etwa von lokaler Batterie- und Komponentenproduktion oder dem Aufbau von Infrastruktur, der stringenten Definition nationaler Normen sowie konkreten Anreizen für indische OEMs soll die Transformation der Mobilität erreicht werden, die sich u. a. im Verkaufsziel von zehn Millionen Elektrofahrzeugen in Indien im Jahr 2030 manifestiert.

Darüber hinaus wurde auf der Zero CO₂ Mobility Conference 2022 auch über den weiter beschleunigten geplanten Ausbau der Ladeinfrastruktur für BEVs berichtet, insbesondere im Bereich der HPC-Lader für die Langstreckenmobilität.

Festkörperbatterien für mehr Nachhaltigkeit

Zur Beschleunigung der globalen Verfügbarkeit von E-Mobilität tragen auch Festkörperbatterien bei, die im Vergleich zu Lithium-Ionen-Akkus mit handfesten Vorteilen punkten können: FEV Partner ProLogium stellte in Aachen seine jüngste Produktgeneration vor, die sich durch eine um bis zu 79 Prozent höhere Energiedichte bei 66 Prozent schnellerer Ladezeit und 16 Prozent geringeren Kosten gegenüber konventioneller Lithium-Ionen-Technologie auszeichnet. Zudem ist der verwendete Festkörperelektrolyt zu 90 Prozent recyclebar sowie wiederverwendbar und auch die intrinsische Sicherheit der Batterien gegenüber thermischem Durchgehen konnte deutlich erhöht werden.

FEV als Partnerunternehmen von ProLogium verfügt über langjährige Erfahrung in der Batterieentwicklung. Das maßgeschneiderte Design und die Integration von Batteriesystemen berücksichtigen sowohl das Batteriemanagementsystem als auch die Zellen, Module und Packs. Je nach Anwendung bietet das Unternehmen Lösungen mit hoher spezifischer Leistungs- und Energiedichte. Mit dem eDLP bei Leipzig betreibt FEV das weltweit größte unabhängige Batterieentwicklungs- und Testzentrum für Hochvoltbatterien.

Ausstieg aus fossilen Energieträgern alternativlos

Trotz der beeindruckenden technologischen Fortschritte ist das angepeilte Klimaziel für 2050 nicht zu erreichen, wenn nicht schnellstmöglich striktere Vorgaben zur Senkung von Energieverbrauch und CO₂-Emissionen umgesetzt werden, so das Fazit zahlreicher Beiträge wie auch der spannenden Paneldiskussion bei der diesjährigen FEV Konferenz. Folgende Optionen wurden in dieser Expertenkonferenz diskutiert:

- CO₂-Besteuerungsmodelle im Transportsektor bis hin zu Extremwerten von 1.000 Euro pro Tonne CO₂ (dies entspräche allein 2,56 Euro CO₂-Steuer pro Liter Dieselmotorkraftstoff) zur Beschleunigung des Technologiewandels weg vom fossilen Verbrenner.
- Deutlich höhere RFNBO-Quoten (Renewable Fuels of non-Biological Origin) für den Einsatz von E-Fuels in Bestandsflotten; hier werden aktuell nur ca. 5,5 Prozent in der EU in 2030 angestrebt.
- Auch ein kompletter Ausstiegszeitpunkt in 2040 aus fossilem Benzin und Diesel wurde diskutiert, ähnlich dem Kohleausstieg in Deutschland. Somit würden alle Fahrzeuge entweder elektrisch, mit Wasserstoff, oder mit H₂-basiertem E-Fuel und partiell mit Biokraftstoffen fahren, inklusive der Bestandsflotten.
- Zudem können Geschwindigkeitsbegrenzungen für den Autobahnverkehr mit unmittelbarer Wirkung ebenso zur CO₂-Reduktion im Transportsektor beitragen: ein bis zwei Prozent bei 130 km/h in Deutschland, sogar vier Prozent bei 100 km/h wie in den Niederlanden.

Den bestehenden Kurs fortzusetzen sei in keinem Fall eine Option. Nur alle genannten Maßnahmen zusammen können den Weg von den fossilen Energieträgern weg und hin zu der Erreichung der Klimaziele 2050 im Transportsektor ermöglichen. Allerdings nur, wenn damit sofort und zusätzlich zu dem begonnenen technologischen Wandel hin zu Elektromobilität und zu wasserstoffbasierten Energieträgern gestartet werde.

Dabei ist positiv bewertet worden, dass nahezu alle Automobilhersteller die E-Mobilität mit großer Energie weiter vorantreiben. Jedoch ist es seitens des Gesetzgebers wichtig, entsprechende Randbedingungen zu schaffen, die das Fahren mit fossilen Energieträgern unattraktiv machen. Die Mobilität muss schnellstmöglich auf regenerativen Strom und regenerative H₂ basierte Energieträger umgestellt werden. Eine deutliche CO₂-Besteuerung wäre der richtige Impuls aus Brüssel. Die aktuell geplante Regelung von 5,5 Prozent RFNBOs Kraftstoffbeimischung für die Bestandsflotten bis 2030 und 100 Prozent E-Fahrzeuge bis 2035 reicht für die Klimaziele nicht aus.

Besuchen Sie uns auf der siebten internationalen Zero CO₂ Mobility Conference, die dieses Jahr als Special Edition am 7. und 8. November in Berlin stattfindet.



Eindrücke



#9

FEV und UTAC nehmen **erstes Entwicklungs- und Testzentrum Afrikas** in Marokko in Betrieb

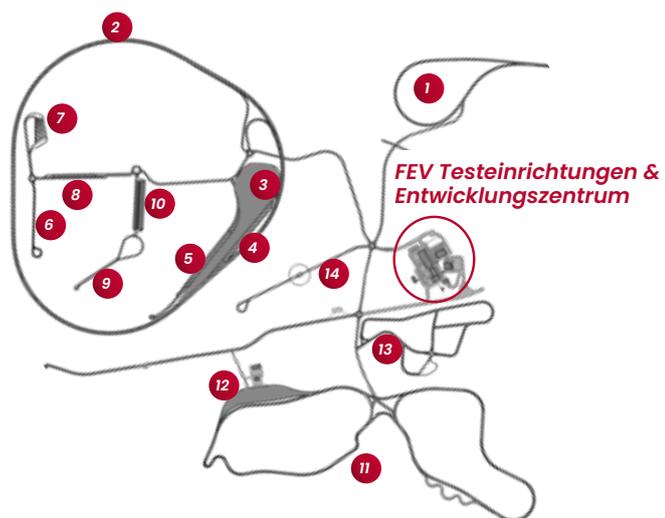
Premiere auf dem afrikanischen Kontinent: FEV hat gemeinsam mit Joint Venture-Partner UTAC das erste Testzentrum Afrikas im marokkanischen Oued Zem, rund 150 Kilometer südöstlich von Casablanca, in Betrieb genommen. Damit bietet FEV als Innovationsführer seinen Kunden nahezu ganzjährig hochattraktive Bedingungen für die Fahrzeugentwicklung und -erprobung.

Der Start des ersten Testzentrums auf afrikanischem Boden ist für FEV ein wichtiger strategischer Meilenstein. Bereits seit 2018 baut das Unternehmen seine Präsenz in Marokko aus und kann seinen Kunden jetzt vor den Toren Europas ein einzigartiges Paket an modernsten Entwicklungs-, Erprobungs- und Homologationsleistungen zur Verfügung stellen.

Die Anlage in Oued Zem liegt auf 850 Metern Höhe im marokkanischen Atlas-Vorgebirge. Das Gelände mit insgesamt 500 Hektar Fläche umfasst ein weitläufiges, komplett neu gebautes Testgelände für Pkw und Nutzfahrzeuge, das auf insgesamt 14 Teil- und Einzelstrecken unterschiedlichste Erprobungsfahrten ermöglicht. Herzstück ist eine auf vier Kilometer angelegte Ausrollstrecke



- 1 Coast down (4 km long)
- 2 High speed track
- 3 Dynamic platform #1
- 4 Dry braking
- 5 Wet braking / Low grip track
- 6 Dirt track
- 7 Sloped tracks
- 8 Acoustic test track
- 9 Degraded road
- 10 Special tracks (undulated track, acoustic tunnel, gravelled track, ford crossing, bumps, cobbled track)
- 11 Road circuit
- 12 Dynamic platform #2
- 13 Urban track
- 14 ISO 10844 acoustic track





»Das Gelände mit ca. 500 Hektar umfasst ein komplett neu gebautes Testgelände für Pkw und Nfz, das auf insgesamt 14 Teil- und Einzelstrecken unterschiedlichste Erprobungsfahrten ermöglicht.«

(entsprechend EU- und japanischer Vorgaben nach ISO 1702507.22), die unter diesen günstigen Bedingungen weltweit einzigartig ist. Testabschnitte für Hochgeschwindigkeitsfahrten, Bremsprüfungen und Akustiktests sowie Steigungshügel und Schlechtwegstrecken, eine ISO 10844 Akustikstrecke, Stadtumgebung und weitere Teststrecken ergänzen das Portfolio. Das warme und trockene Klima von Oued Zem lässt einen nahezu ganzjährigen Testbetrieb zu. Auch für Langstreckenfahrten im nur 70 Kilometer entfernten Atlas-Hochgebirge ist der neue Standort ein idealer Ausgangspunkt.

Im angeschlossenen, ebenfalls neu errichteten Testzentrum finden Kunden ein komplettes Angebot an Prüfständen für die Antriebsstrangentwicklung (Elektro-, Hybrid- und Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren), RDE-Zyklen, Dauer- und Zuverlässigkeitserprobungen, Dynamik-, Akustik- und Klimatests. Zusätzlich sind in dem hochmodernen Gebäudekomplex großzügige Büros, Konferenz- und Seminarräume sowie Präsentationsflächen untergebracht. Für Kundenfahrzeu-

ge stehen insgesamt vier Hallen mit separaten Eingängen, Büro- und Werkstattflächen zur Fahrzeugvorbereitung zur Verfügung. Ein eigens für die Gäste des Testzentrums errichtetes Hotel mit Restaurants, Spa und Freizeioptionen rundet das Angebot ab.

Vom Hafen in Casablanca sind es nur anderthalb Stunden Fahrt nach Oued Zem, wobei FEV seinen Kunden auf Wunsch auch die komplette Testabwicklung inklusive Abholung und Rücktransport der Fahrzeuge abnimmt. Zudem bietet sich das Areal hervorragend als attraktives Umfeld für Veranstaltungen wie z. B. Fahrzeugpräsentationen, Fahrertrainings oder interne Schulungen an.

Mit dem neuen Entwicklungs- und Testzentrums baut FEV seine Position als wichtiger Partner führender Unternehmen der Transportindustrie in Marokko aus, zu der Hersteller, Zulieferer und Testlabore, aber auch Schulen und Universitäten gehören.

mehr als
7.200 FEV
Experten
weltweit



FEV Europe GmbH
Neuenhofstraße 181
52078 Aachen
Deutschland
T +49 241 5689-0
marketing@fev.com

FEV North America, Inc.
4554 Glenmeade Lane
Auburn Hills
MI 48326-1766 · USA
T +1 248 373-6000
marketing@fev-et.com

FEV China Co., Ltd.
168 Huada Road
Yanjiao High-Tech Zone
065201 Sanhe City,
Langfang Hebei Province
China
T +86 10 80 84 11 68
fev-china@fev.com

FEV India Pvt. Ltd.
Technical Center India
A-21, Talegaon MIDC
Tal Maval District
Pune 410 507 · Indien
T +91 2114 666 - 000
fev-india@fev.com

SPECTRUM #76
Ausgabe 01/2023

Redaktion
Marius Strasdat
FEV Europe GmbH
Gestaltung
Verena Mainz
FEV Europe GmbH

Leserservice

Sie möchten auch regelmäßig
das SPECTRUM erhalten oder
Ihre Anschrift hat sich geändert?
Senden Sie Namen, Unternehmen
und Anschrift per E-Mail an
spectrum@fev.com



feel evolution