



SPECTRUM

NACHHALTIGE MOBILITÄT WEITER GEDACHT

Hybrid-BEV Plattform

**Brennstoffzellen-
Kaltstart**

**Verdichterdesign für
Brennstoffzellen**

Defossilisierung

BEV-Stromspeicherung

FEV Energy



Liebe Leserinnen und Leser,

FEV steht seit mehr als 40 Jahren für zukunftsweisende Entwicklungen, die zu einer nachhaltigen, sicheren und komfortablen Mobilität beigetragen haben. Aktuell sind der automobiler Wandel und die damit einhergehenden Herausforderungen für unsere Kunden größer denn je. Uns inspiriert dieser Wandel und stellt gleichzeitig eine weitere Möglichkeit dar, unseren Kunden als verlässlicher Partner mit innovativen Lösungen zur Seite zu stehen. In dieser SPECTRUM-Ausgabe möchten wir Ihnen eine aktuelle Auswahl vorstellen.

So präsentieren wir mit Hybrid-BEV eine native BEV-Plattform, die eine Verbrennungskraftmaschine als hoch effizientes Energiewandlersystem integriert und das Fahrgefühl eines BEV vermittelt. Gleichzeitig wird aber die Reichweite aktueller Dieselfahrzeuge bei extrem geringen Emissionen erreicht. Die Ein-Plattform-Strategie bietet beim Übergang in die reine Elektromobilität für Hersteller gleichzeitig enormes Einsparpotenzial auf der Grundlage einer BEV-Plattform. In einem weiteren Artikel befassen wir uns mit der Frage, wie Elektrofahrzeuge auf Basis von Brennstoffzellen eine echte Alternative zu Verbrennern oder batterieelektrischen Antrieben werden können. Eine wichtige Voraussetzung hierfür ist unter anderem, dass ihr Betrieb bei extremen Minusgraden verbessert werden muss. FEV hat untersucht, wie ein Kaltstart am besten erreicht werden kann, ohne die Funktionsweise oder Lebensdauer einer Brennstoffzelle zu beeinträchtigen.

Sollen Brennstoffzellen hohe Leistungen abgeben, ist Turboaufladung sehr sinnvoll. Da es ein breites Anwendungsspektrum gibt und in naher Zukunft nur begrenzte Stückzahlen zu erwarten sind, wird die Entwicklung maßgeschneiderter Verdichter jedoch teuer. Auf den folgenden Seiten präsentieren wir Ihnen mit einem ganzheitlichen Simulationsprozess unsere Lösung, die Kosten senkt und Effizienz optimiert.

In einem weiteren Artikel dieser Ausgabe zeigen wir zudem, welches enorme Potenzial Wasserstoff in Verbrennungsmotoren bietet und welche Abgasnachbehandlungssysteme zur Vermeidung von NOx-Emissionen hierbei sinnvoll sind. Außerdem gehen wir auf neue Ansätze für bessere Batterieeigenschaften bei der Elektromobilität ein und präsentieren einen neuen Wärmemanagementansatz für die gängigsten Elektromotorentopologien. Mit diesem lässt sich der Energieverbrauch ohne viel Aufwand signifikant senken – und bei kommenden E-Motorgenerationen ist das Potenzial sogar noch höher.

Ich wünsche Ihnen eine spannende Lektüre.



Dr. Norbert W. Alt
Chief Operating Officer (COO) und Geschäftsführer
der FEV Group GmbH

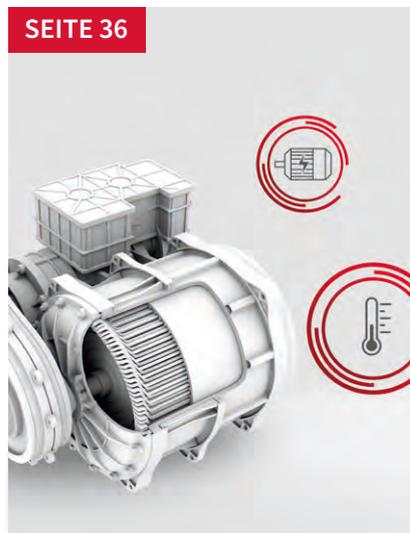




Hybrid-BEV Plattform



Brennstoffzellen-Kaltstart



Stromsparstrategie für den E-Motor

01 TECHNISCHE ENTWICKLUNG MADE BY FEV

04 Flexibler ins E-Zeitalter mit Hybrid-BEV

10 Eisbrecher gesucht: Wie Brennstoffzellen winterfest werden

16 Simulation senkt Kosten und optimiert die Effizienz

24 Wasserstoff kann saubere Verbrenner wahr machen

30 FEV umspannt Batterie-Megatrends von Materialvielfalt über Sicherheit bis Energiedichte

36 FEV stärkt die Elektroautoeffizienz durch thermische Feldschwächung

02 NEWS

44 Zero CO₂ Mobility – Elektrifizierung treibt Transformation der Mobilität voran, Fahrplan für E-Fuels steht aus

48 Neues Geschäftsfeld FEV Energy bietet Lösungen für Energiesektor

HYBRID-BEV PLATTFORM

FLEXIBLER INS E-ZEITALTER MIT HYBRID-BEV

Während der europäische Markt zunehmend auf reine Elektromobilität setzt, erlebt China ein Revival der Hybridtechnologie mit ihren Reichweitenvorteilen: Das dort aktuell meistverkaufte sogenannte NEV-(New Energy Vehicle)SUV besitzt eine 40 kWh-Batterie und eine Verbrennungskraftmaschine als Energiewandlersystem in serieller Hybridkonfiguration. Unter die NEV-Kategorie fallen rein batterieelektrische Autos ebenso wie solche mit Brennstoffzelle, Plug-in- sowie serielle Hybridfahrzeuge. Automobilhersteller sehen sich somit einer besonderen Herausforderung gegenüber, denn die parallele Entwicklung sowohl einer nativen BEV-(Battery Electric Vehicle) als auch einer klassischen Verbrenner-Plattform für verschiedene Marktbedarfe erhöht die Entwicklungskosten deutlich.





Die Diskussion über die CO₂-Emissionen und den durch sie verursachten Klimawandel geht seit Jahren durch alle wichtigen Branchen, den Automobil- und Transportsektor betrifft sie besonders. Sowohl in der öffentlichen Wahrnehmung des Automobils als auch in der Gesetzgebung stehen Fahrzeuge mit umweltverträglichem, konkret: mit elektrifiziertem Antriebsstrang, im Fokus. In Europa beispielsweise ist ab 2030 eine Reduzierung der CO₂-Emissionen um 37,5 Prozent (im Vergleich zu 2021) für neu auf den Markt gebrachte Pkw-Flotten vorgeschrieben. Im Gespräch sind noch ambitioniertere Ziele, die Emissionen zu reduzieren: Minus 55 Prozent schlägt die europäische Kommission im Rahmen ihres „Green Deal“ vor. Langfristiges Ziel ist es, bis 2050 einen Netto-Null-Ausstoß an Treibhausgasen (Greenhouse Gases, GHG) zu erreichen. All dies dürfte dazu führen, dass der Anteil der Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb innerhalb des nächsten Jahrzehnts deutlich zunehmen wird. Elektrifizierung ist der wichtigste Hebel zur Reduzierung der CO₂-Emissionen im gesamten Verkehrssektor.

Warum zwei Plattformen?

Um die EU-Vorschriften für CO₂-Emissionen ab 2030 zu erfüllen und Strafzahlungen zu vermeiden, bereiten sich die Automobilhersteller vor, einen erheblichen Anteil von Fahrzeugen mit elektrischen Hybridantrieben (xHEV) und batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) auszuliefern. Die OEMs haben ihre Modellpalette entsprechend angepasst. Sie wenden derzeit eine Zwei-Plattform-Strategie innerhalb eines Fahrzeugsegments an, um die Vorteile jedes Antriebsstrangs zu optimieren. Diese umfasst in der Regel eine neuere, reine BEV-Plattform und eine traditionellere, native ICE-Plattform (Internal Combustion Engine) für den konventionellen Antriebsstrang und seine Hybridvarianten. Die Absatzprognosen bei Personenkraftwagen zeigen für 2030 jedoch immer noch eine erhebliche Abweichung bei rein batteriebetriebenen E-Fahrzeugen. Sie reicht von 15 bis 40 Prozent zwischen den Hauptmärkten EU, USA und China. Da die Nachfrage nach reinen Verbrennungsmotoren zurückgehen dürfte, müssen die Automobilhersteller in Zukunft flexibel auf unterschiedliche Abverkaufszahlen von BEVs einerseits und xHEVs andererseits reagieren. Dies ist bei einer Zwei-Plattform-Strategie schwieriger.

Angesichts dieser Bedingungen wäre eine Lösung, die nur auf einer einzigen Plattform aufbaut, ein besserer Ansatz für die Elektrifizierung des Antriebsstrangs, insbesondere für kleinere OEMs oder Startups. FEV hat daher untersucht, wie sich auf der Grundlage einer nativen BEV-Plattform ein hocheffizientes Energiewandlersystem integrieren lässt, der das Fahrgefühl und das Image eines BEV hat, aber die Reichweite aktueller Dieselfahrzeuge.

Ein solches Konzept wäre tragfähig, wenn BEV- und xHEV-Fahrzeuge flexibel auf der Grundlage einer einzigen Plattformstrategie realisiert werden könnten — und dies, ohne Kompromisse bei einer der beiden Fahrzeugkategorien eingehen zu müssen. Eine weitere Voraussetzung ist, dass der (BEV-eigene) serielle Hybrid keine deutlichen CO₂-Nachteile im Vergleich zu einer Hybridlösung aufweist, die aktuell auf ICE-Plattformen (mit physischer Verbindung von Verbrennungsmotor zu den Rädern) basiert.

Dies ist das Thema einer FEV Studie, die sich auf einen SUV des D/E-Segments (Obere Mittelklasse / Luxusklasse) konzentriert. Mögliche Kompromisse bei der Leistung sowie beim Fahr- und Beifahrerkomfort werden in dieser Klasse am kritischsten bewertet. Gleichwohl könnte der Hybrid-BEV-Ansatz von FEV als Ein-Plattform-Konzept auch auf verschiedene Segmente übertragen werden inklusive LCV (Light Commercial Vehicles, leichter Nutzfahrzeuge) oder anderer Nutzfahrzeuge.

Spezifikationen für das Ein-Plattform-Konzept

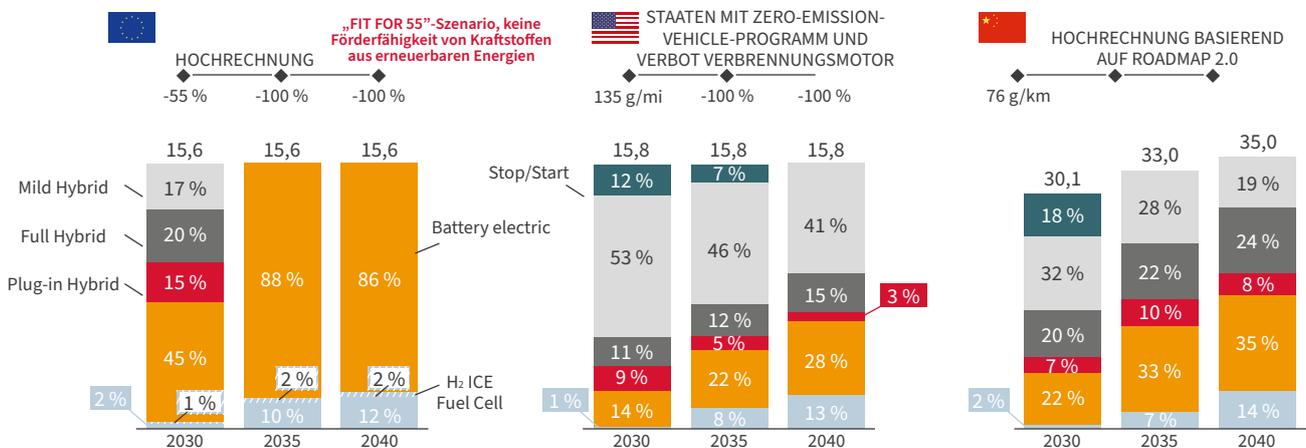
Wie müsste ein Hybridfahrzeug (basierend auf einer nativen BEV-Plattform) ausgelegt sein, um einen großen Teil des aktuellen Mobilitätsbedarfs von Autofahrern abzudecken? Darüber geben Daten Aufschluss, die FEV in Deutschland aus Endkundenbefragungen zu den alltäglichen Fahrstrecken gewonnenen hat: Nur drei Prozent aller Fahrten sind länger

als 100 km, aber diese drei Prozent machen 27 Prozent der gesamten Pkw-Fahrleistung aus. Dagegen entfallen nur acht Prozent der Pkw-Fahrleistung auf Fahrten über 100 km. Mit einer elektrischen Reichweite von ca. 130 km werden sowohl Kundenanforderungen als auch zukünftige globale Zertifizierungs- oder Steuerkriterien erfüllt. Dennoch wurde eine Gesamtreichweite von 1.000 km als geeignet definiert, um eine nahezu „unbegrenzte“ Reichweite verfügbar zu machen, wie sie viele Dienstwagennutzer mit konventionellem Diesel-Antrieb kennen. Ein BEV-Hybridauto mit 1.000 km Gesamtreichweite müsste also 870 km im Charge-Sustaining-Mode zurücklegen können (bei dem der Verbrennungsmotor die Batterien lädt).

Aus diesen Anforderungen lassen sich für einen SUV im D/E-Segment folgende konkrete Leistungsparameter für den Antriebsstrang ableiten: eine elektrische Antriebsleistung von 215 kW (315 kW für Allradfunktion) bei einer Batteriekapazität von 27 kWh. Ein Kraftstofftank von 40 l sollte angesichts eines hocheffizienten Antriebsstrangs ausreichen, der Verbrennungsmotor mit einer Leistung von ca. 90 kW hat keine Leistungseinbußen bei leerer Batterie. Der Serien-Parallelhybrid auf Basis eines Verbrennungsmotors ist mit 2,0 l 4-Zylinder und 135 kW ausgestattet.

Ein elektrifizierter Antriebsstrang bietet auch die Möglichkeit, die Frontpartie zu optimieren, um den vorderen Überhang eines Fahrzeugs zu verkürzen. Styling zählt nach wie vor zu den wesentlichen Kaufanreizen für die Endkunden, ein minimaler vorderer Überhang bleibt also eine wichtige Anforderung. Darüberhinaus kann so der Radstand vergrößert werden, ohne zugleich die Gesamtfahrzeuginnenlänge zu erhöhen. Dies ermöglicht eine Komfortverbesserung für den Kunden durch einen vergrößerten Sitzabstand und mehr Platz im Fahrgastraum. Dennoch ist der Verbrennungsmotor mit einer Leistung von etwa 90 kW aus NVH- und Gewichtsausgleichsgründen vorne (quer) untergebracht.

Szenario: Beschleunigter Wandel in der EU / US-Ankündigungen noch nicht berücksichtigt – Oktober 2021

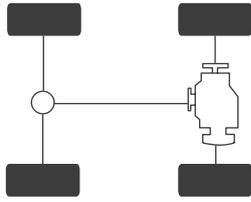


Start-Stopp inkl. 12 V-Energiemanagement; Mildhybride: 12 V und 48 V, Vollhybride inkl. 48 V mit Vollhybrid-Funktionalität

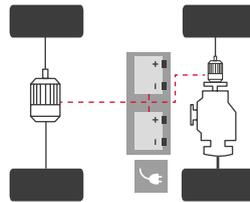
Ⓛ Mögliche Szenarien für den Fahrzeugabsatz: Globale Verschiebung hin zu mehr emissionsfreien Fahrzeugen, Europa an der Spitze, dennoch bleibt der Verbrennungsmotor weltweit auch 2040 wichtig

HEUTE, **2** PLATTFORMEN

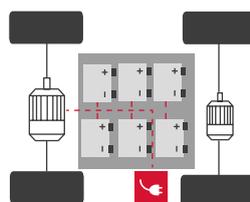
Basis Verbrennungsmotor



(Plug-in)-Hybrid auf Basis Verbrennungsmotor

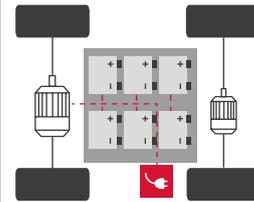


Basis batterieelektrisches Fahrzeug

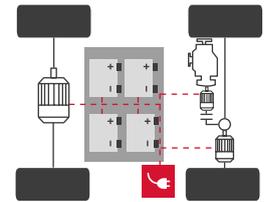


ZUKUNFT, **1** PLATTFORM

Basis batterieelektrisches Fahrzeug



Hybrid-BEV



Legende

- Antriebsstrang
- - - Leistungsverteilung
- Plug-in-Funktionen BEV/PHEV
- Optionale Plug-in-Funktionen (P)HEV



Hybrid-BEV
serielles Hybridfahrzeug auf der Basis eines batterieelektrischen Fahrzeugs

© FEVs Hybrid-BEV ist eine All-in-One-Lösung, die zusätzliche Plattformen überflüssig macht

Auch der Zugang zum Wärmetauscher an der Vorderseite wird dadurch erleichtert. Der Generator und die integrierte Front-EDU für die Allrad-Versionen könnten mit einem kompakten Permanentmagnetmotor ausgestattet werden.

Betrachtet man die Sitzhöhe, zeigt sich eine typische Herausforderung bei der Entwicklung von BEV-Plattformen: Die Integration der Hochvoltbatterie im Unterboden verringert die Sitzhöhe in der ersten und zweiten Reihe. Dies muss durch eine Erhöhung der Gesamthöhe des Fahrzeugs kompensiert werden, um die Kopffreiheit und komfortable ergonomische Werte zu erhalten. Bei den Hybridvarianten des hier untersuchten Ein-Plattform-Ansatzes auf BEV-Basis wird der Platz der ursprünglichen BEV-Batterie für eine kleinere, dedizierte PHEV-Batterie mit 27 kWh genutzt. Dies lässt Platz für eine Fußgarage für die hintere Sitzreihe sowie für den Kraftstofftank und die Abgasanlage.

CO₂-Emissionen eines Hybrid auf BEV-Basis

Eine der entscheidenden Fragen des von FEV untersuchten Ein-Plattform-Ansatzes ist, ob der daraus abgeleitete serielle Hybrid-Antriebsstrang im Hinblick auf die CO₂-Emissionen einen deutlichen Nachteil aufweist im Vergleich zu einem optimierten parallelen Hybrid auf Basis einer nativen ICE-Plattform.

Das Ergebnis: Nach dem WLTP-Zyklus emittiert eine Hybridversion (basierend auf dem Hybrid-BEV-Konzept von FEV) 1 g CO₂/km mehr als ein aktueller. Gemessen nach der strengeren, da Well-to-wheel-basierten japanischen Abgasnorm, sind es 3 g CO₂/km mehr als ein seriell-paralleler Hybrid. Das PHEV-Konzept von FEV für einen SUV im D/E-Segment hätte also keinen deutlichen Nachteil im Hinblick auf die CO₂-Emissionen. Diese sind damit kein kritischer Parameter für die Frage, ob sich ein xHEV-Modell im D- oder E-Segment mit einem Ein-Platt-

Ziele Leistung

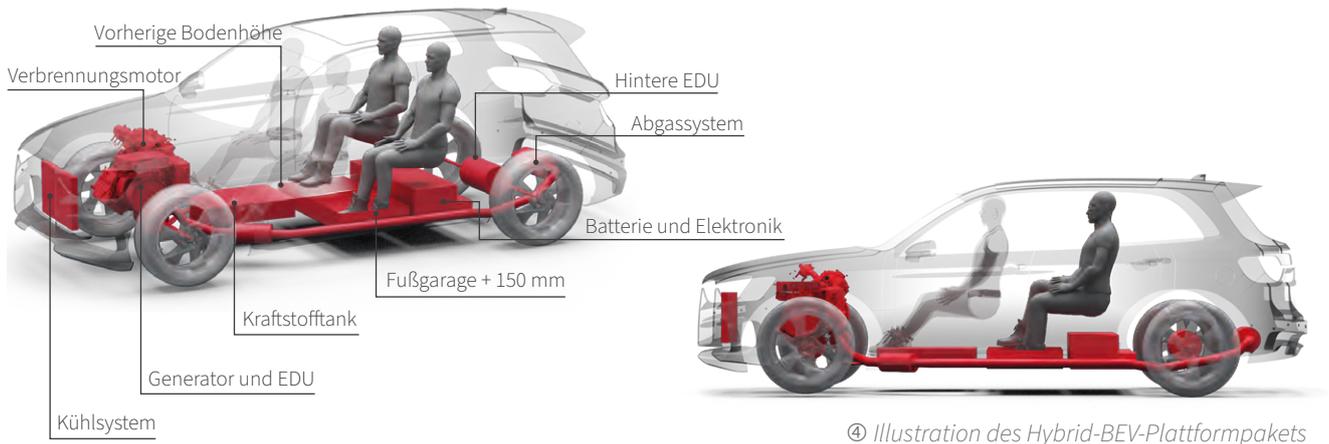
Beschleunigung 0-100 km/h	≤ 8 s (2WD) / ≤ 6.5 s (4WD)
V _{max} @ 0 % Straßenneigung	≥ 185 km/h (leere Batterie)
V _{max} @ 7 % Straßenneigung	≥ 90 km/h (1.600 kg Anhänger)-
V _{max} @ 12 % Straßenneigung	≥ 60 km/h (1.600 kg Anhänger)-
V _{max} @ 30 % Straßenneigung	≥ 20 km/h and 100 m (600 kg Nutzlast)-
Rein elektrische Reichweite (WLTP)	~ 130 km
Gesamtreichweite	1.000 km

Spezifikationen Antriebsstrang



	Hybrid-BEV (Serieller Hybrid)	Hybrid-BEV (Allrad-Version)	Seriell-paralleler Hybrid
Verbrennungsmotor	1.5 L 3 Cyl. 90 kW		2.0 L 4 Cyl. 135 kW
Elektrische Maschine	150 / 215 kW	+ 70 / 100 kW	45 / 65 kW
Generator	109 / 156 kW		56 / 80 kW
Getriebe	1 gear EDU		4 Gears DHT
Batterie		27 kWh	
Volumen Tank		~ 40 L	
Spannungspegel		800 V (wie beim BEV)	400 V

© Leistungsziele und Spezifikationen des Antriebsstrangs



④ Illustration des Hybrid-BEV-Plattformpakets

form-Ansatz auf BEV-Basis realisieren lässt (Abbildung 5).

Weitere Innovationen dürften diese günstigen Verbrauchs- und Emissionswerte in Zukunft noch verbessern. Zum Beispiel wird die Leistungsdichte von Elektroantrieben weiter erhöht. Die für das Jahr 2030 erwartete Generation von E-Antrieben wird mit reiner Ölkühlung (kein Wassermantel zur Kühlung des Umrichters erforderlich), koaxialen 1-Gang-Konstruktionen, vollständiger Abwärmerückgewinnung in Kombination mit einer Wärmepumpe, 800 V und Siliziumkarbid (Si-C)-Umrichtertechnologie ausgestattet sein.

Auch bei Verbrennungskraftmaschinen erlaubt der serielle Hybrid zusätzliche Freiheitsgrade in der Auslegung, wodurch effektive Spitzenwirkungsgrade von über 45 Prozent bei $\lambda = 1$ realisierbar werden. Die Summe dieser Maßnahmen ermöglicht es dem zukünftigen seriellen Hybridantriebsstrang auch bei Autobahn-

betrieb im Rahmen der in Europa erlaubten (Richt-)Geschwindigkeiten einen vergleichbaren Kraftstoffverbrauch zu erzielen wie ein Parallelhybrid mit mechanischem Durchtrieb. Erst bei sehr hohen Geschwindigkeiten, wie sie nur auf deutschen Autobahnen gefahren werden dürfen, würde sich die doppelte Energiewandlung negativ im Kraftstoffverbrauch bemerkbar machen. Im Stadtverkehr hingegen ergeben sich im Vergleich für den Hybrid-BEV bessere Verbrauchswerte.

Eine weitere Frage ist, wie sich das Ladeverhalten auf die realen Emissionen eines xHEV-Fahrzeugs auf Basis einer BEV-Plattform auswirkt. FEV führte dazu ergänzende Studien durch, die auf einem „angepassten Geschäftsfahrzyklus“ von FEV basieren. Dieser Zyklus geht von einer 23 km langen Fahrt zur Arbeit, kleineren Freizeitfahrten am Wochenende und einer monatlichen Geschäftsfahrt von 300 km sowie einer monatlichen Familienfahrt von 200 km aus (alle Zahlen sind Einwegfahrten).

Das einmalige (zweimalige/dreimalige) Aufladen der Batterie pro Woche führt bereits zu niedrigen CO₂-Emissionen von 86 (72/58) g/km, während das Aufladen der Batterie vor jeder Fahrt eine weitere Reduzierung auf 30 g CO₂/km bewirkt. Für einen typischen FEV Geschäftswagenfahrer (der vier Mal mehr Langstrecken fährt als der Durchschnitt) führt das zweimalige Aufladen der Batterie pro Woche also zu CO₂-Emissionen von 72 g/km, was einem Verbrauchswert von 3,1 l/km für einen SUV des D/E-Segments entspricht.

Die FEV Studie zeigt also, dass der Übergang zur Ein-Plattform-Strategie (auf BEV-Basis) nicht nur aus technischer Sicht machbar, sondern auch wirtschaftlich attraktiv ist. Vor allem kleinere OEMs und Start-ups können mit Hybrid-BEV deutliche Kostenvorteile realisieren. Denn sie können die aktuellen Kundenerwartungen und -bedürfnisse nach einem Fahrzeug mit unterschiedlichen Antrieben im D/E-Segment ohne großen Zusatzaufwand auf einer BEV-Plattform erfüllen.

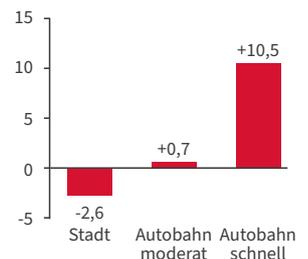
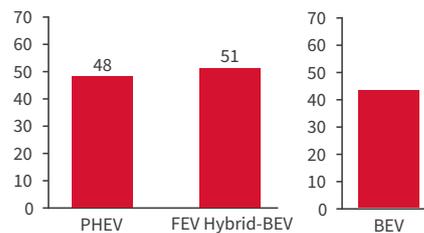
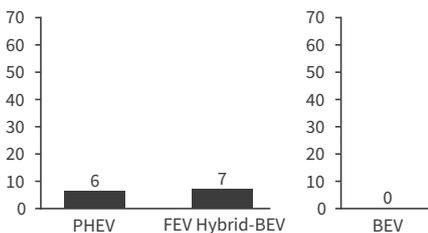
Vergleich PHEV und FEV Hybrid-BEV



Europäische Tank-to-wheel Gesetzgebung: Kombinierte Emissionen in gCO₂/km

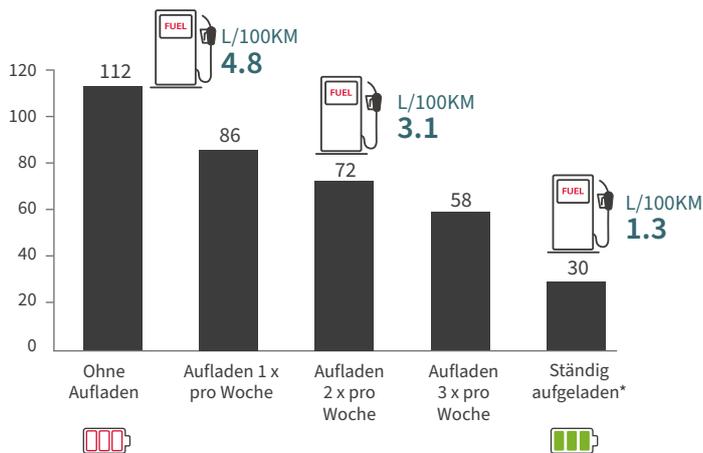
Japanische Well-to-wheel Gesetzgebung: Kombinierte Emissionen in gCO₂/km

Reale Fahrbedingungen Charge sustaining mode Kraftstoffmehrverbrauch FEV Hybrid-BEV vs. PHEV in %



© Vergleich PHEV und FEV Hybrid-BEV für Japan und EU sowie unter realen Fahrbedingungen im Charge Sustaining Modus

CO₂-Emissionen eines Hybrid-BEV-Fahrzeugs mit 1,5 l 3-Zylinder DHE mit 45 % Wirkungsgrad in gCO₂/km



* Jede Fahrt wird mit voll geladenem Akku angetreten
 ** Bereinigt um den erwarteten Rückgang der Dienstreisen aufgrund des höheren Anteils von Online-Meetings

© Auswirkung des Batterieladeverhaltens auf reale CO₂-Emissionen bzw. den realen Kraftstoffverbrauch beim BEV-Hybridansatz von FEV



FEV DIENSTWAGEN-FAHRZYKLUS**

- **Tägliche Fahrt zur Arbeit**
– Distanz: 23 km (ein Weg)
- **Kleinere Freizeitfahrten am Wochenende**
– Distanz: 12,5 km (ein Weg)
- **Eine Geschäftsreise pro Monat**
– Distanz: 300 km (Autobahn, ein Weg)
- **Eine Wochenend-Reise mit Familie pro Monat**
– Distanz: 200 km (Autobahn, ein Weg)

LAUFLEISTUNG ÜBER 100 KM DISTANZ

Deutscher Durchschnitt 8 %

FEV Dienstwagenfahrer ** **33 %**

Von

Dr. Tolga Uhlmann · uhlmann@fev.com

Dr. Norbert Alt · alt@fev.com

Dr. Christian Sahr · sahr@fev.com

Tobias Voßhall · vossball@fev.com

Drei Fragen an ...

Dr. Tolga Uhlmann, Vice President Motor & Hybrid Powertrains, FEV Europe GmbH

Einen seriellen Hybrid kennt man schon länger. Was ist das Neue an der FEV Plattform eines Hybrid-BEV?

Die bekannten seriellen Hybridfahrzeuge basieren mit wenigen Ausnahmen auf Plattformen der verbrennungsmotorischen Fahrzeugmodelle. Wir haben nun untersucht, wie man auf der Grundlage einer BEV-Plattform Hybridvarianten ableiten kann. Eine solche Ein-Plattform-Strategie ist deutlich kosteneffizienter und bringt vor allem Vorzüge für kleinere Hersteller oder Start-ups.

Welche Vorzüge hat das aus Sicht der Endkunden?

Der „klassische“ Range-Extender reduziert in der Regel die Fahrleistung, wenn die Batterie leer ist, während der PHEV auf Verbrenner-Plattform mit mechanischer Verbindung sich wie ein herkömmlicher Verbrenner-Antriebsstrangs anfühlt, wenn er im Ladeerhaltungsmodus läuft. Beides ist bei unserem Hybrid-BEV nicht der Fall: Er bietet volle Fahrleistung unter allen Bedingungen und hat in Kombination das Fahrgefühl eines echten BEV und erreicht aufgrund des hocheffizienten Energiewandlersystems sehr gute CO₂-Werte.

Sind Hybridvarianten überhaupt noch attraktiv? Angesichts immer schärferer Emissionsbeschränkungen geht der Trend doch eindeutig zum rein elektrischen Antrieb.

Zum einen: Ja, gerade mit Blick auf Emissionssenkung kommt es auf schnelle Effekte an. Und da ist ein Plug-in-Hybrid nach wie vor eine attraktive Lösung. Wir haben errechnet, dass selbst die strengen Vorgaben der EU-Kommission, wie sie sich im „Fit for 55“-Programm manifestieren, durch einen Flottenmix von BEV und xHEV erreicht werden kann. Dabei wäre der BEV-Anteil mit 27 Prozent sogar vergleichsweise gering.

Zum anderen: Jeder OEM muss BEV-Plattformen entwickeln, aber die meisten OEMs können nicht auf die Geschäftswagenfahrer verzichten, der noch nicht bereit sind, den Schritt zur reinen Elektrifizierung zu tun. Die von uns vorgeschlagene Ein-Plattform-Strategie auf der Grundlage eines BEV hat ja zum Ziel, den Übergang in die reine Elektromobilität nicht nur für kleinere OEM oder Start-ups so kosteneffizient wie möglich zu machen. Da die Nachfrage im Augenblick noch höchst volatil ist, bekommen sie so die Flexibilität, die sie für ihre Modellplanung benötigen.

BRENNSTOFFZELLEN-KALTSTART

EISBRECHER GESUCHT: WIE BRENNSTOFFZELLEN WINTERFEST WERDEN

Können Elektrofahrzeuge auf Basis von Brennstoffzellen eine echte Alternative zu Verbrennern oder batterieelektrischen Antrieben werden? Dazu muss ihr Betrieb bei extremen Minusgraden besser werden. FEV hat diese Herausforderung erkannt und angenommen.





Brennstoffzellen für Fahrzeugantriebe können auf eine lange Historie zurückblicken. Zweifellos hat diese Technologie das Potenzial, einen wesentlichen Beitrag in Richtung null Emissionen und CO₂-freie Mobilität zu leisten, sofern der Wasserstoff von erneuerbaren Energien stammt.

Damit Brennstoffzellenfahrzeuge (Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV) aber eine effiziente und wettbewerbsfähige Alternative zu Verbrennungsmotoren und rein batterieelektrischen Fahrzeugen sowohl für den Schwerlastverkehr als auch für Personenkraftwagen werden können, ist weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeit äußerst wichtig. Skaleneffekte greifen dann für FCEV genauso wie für batterieelektrische Fahrzeuge. Gerade beim Schwerlast- und Langstreckenverkehr machen die hohe Energiedichte von Wasserstoff und kurze Betankungszeiten, die denen von Benzin und Diesel entsprechen, die Brennstoffzelle zur idealen Lösung. Darüber hinaus braucht es eine hohe Lebensdauer und Zuverlässigkeit. Untersuchungen von FEV zeigen schon jetzt, dass die Lebensdauer von Brennstoffzellen weiter verbessert werden kann.

Die Korrosion der Bipolarplatten sowie die Degradation von Katalysator und Membran sind drei wesentlichen Faktoren, die die Lebensdauer von Brennstoffzellen beeinträchtigen. In der Forschung wird zum Beispiel untersucht, welche Materialien für die Bipolarplatten, die ein wesentlicher Bestandteil der Brennstoffzellenstacks sind, idealerweise eingesetzt werden sollten. Graphit-Polymer-Verbindungen anstelle reiner Graphitplatten könnten eine gute Lösung sein.



① FEV Versuchsträger Hyundai Nexo

Kaltstart als große Herausforderung

Außer Kostenreduzierung und Alterungseffekten sind Kaltstarts bei tiefen Minusgraden in der Phase, in der das System hochgefahren wird, noch eine echte Herausforderung. Angesichts einer Vielzahl von Möglichkeiten bei der Konstruktion des komplexen Brennstoffzellensystems (Fuel Cell System, FCS), gilt es, den bestmöglichen Kompromiss zu finden. Die Lösungen können von einem FCEV zum anderen variieren, je nachdem, wie die Gesamtarchitektur des Fahrzeugs aussieht und welche Erwartungen an Leistung, Zuverlässigkeit und Lebensdauer geknüpft sind.

Beim Hyundai Nexo hat FEV die Kaltstarts, die das Brennstoffzellensystem stark belasten und dem Verschleiß aussetzen,

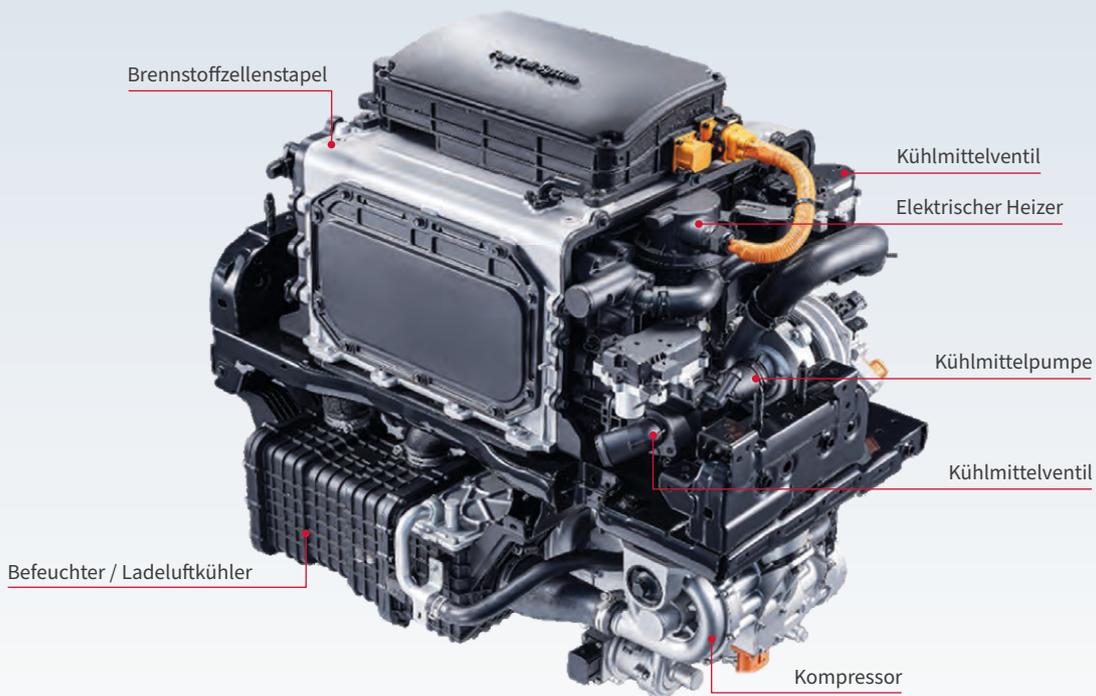
unter die Lupe genommen. Die Experten haben beispielsweise untersucht, unter welchen Bedingungen und wann genau das Zellprodukt Wasser voraussichtlich gefriert und somit nicht nur einen erfolgreichen Startvorgang verhindert, sondern darüber hinaus die Zellen dauerhaft schädigt.

Um besser verstehen zu können, wie sich der Kaltstart auf Zellebene auswirkt, wurden detaillierte mehrdimensionale numerische Strömungsmechanik-Studien (Computational Fluid Dynamics, CFD) durchgeführt. Ausgehend von einer Temperatur von -30 °C wurde der Startvorgang mit Zellsektionen simuliert und dabei die verschiedenen Unterstützungsprozesse auf der Zeitskala betrachtet. Darüber hinaus hat FEV geprüft, inwieweit 1D-Simulationssysteme möglich sind.

Eis im System als Schadenfaktor

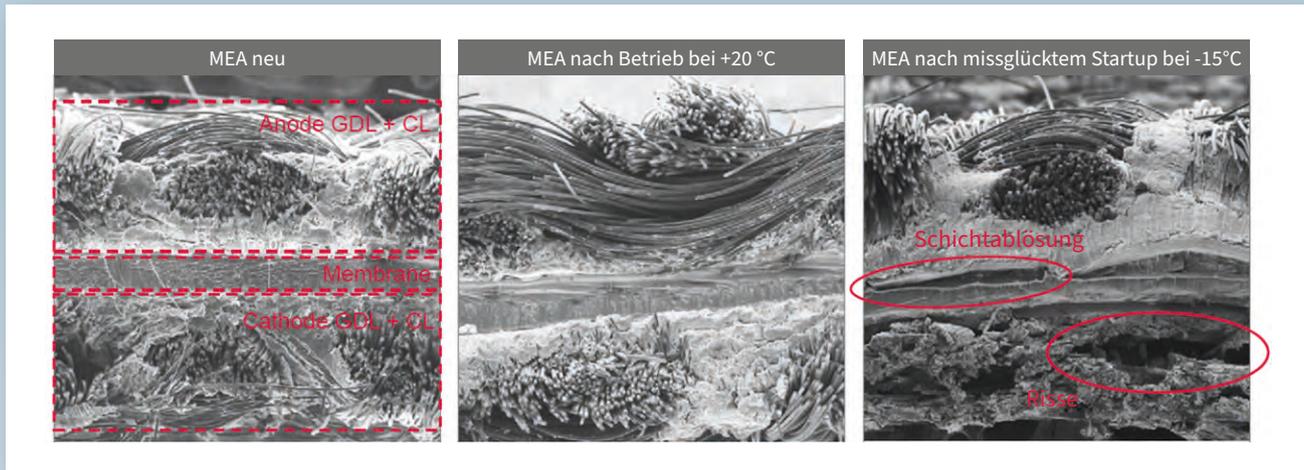
Tatsächlich verstärken sich die oben erwähnten Degradationsmechanismen, also Korrosion, Katalysator- und Membranabbau, bei Brennstoffzellenkaltstarts erheblich. Um Schäden an der Elektroden-Membrananordnung (Membrane Electrode Assembly, MEA) oder der Gasdiffusionsschicht (Gas Diffusion Layer, GDL) zu vermeiden, die auf die Bildung von Eis innerhalb der Zelle zurückzuführen sind, werden bei Serienfahrzeugen mit Brennstoffzellen heute schon viele Kaltstartstrategien angewendet.

Während eines Kaltstarts bildet das Wasser, das aus der elektrochemischen Reaktion von Wasserstoff mit Luft entstanden ist, immer dann Eis, wenn der Brennstoffzellenstapel kalt ist. Das Eis baut sich innerhalb der Katalysatorschichten, der porösen



② Brennstoffzellensystem im Hyundai Nexo

Bild: Hyundai



© Beschädigung der MEA durch missglückte Brennstoffzellen-Kaltstarts

Bild: 10.1016/j.jpowsour.2006.02.075

Schichten und der Strömungskänae in der Brennstoffzelle auf. Während Eis innerhalb des Kanals die Versorgung der Brennstoffzelle unterbindet und damit zu einem Zusammenbruch der Zellspannung führt, kann Eis in den porösen Schichten ernsthafte Schäden an der Brennstoffzelle verursachen und muss daher unbedingt verhindert werden. Wenn sich Eis innerhalb der porösen Medien zu bilden beginnt, blockieren kleine Eislinsen die Poren und verringern den Gastransport, was eine verminderte Zelleistung nach sich zieht.

Steigt die Eismenge, nehmen die elektrochemisch aktiven Bereiche immer mehr ab, es kommt zu weiteren Leistungseinbußen. Schließlich füllt das Eis sämtliche Hohlräume innerhalb der porösen Medien, und weil sich das Eis ausdehnt, werden die Zellschichten hohen mechanischen Spannungen ausgesetzt. Diese führen dazu, dass sich die Elektrodenmembran-Montageschichten voneinander lösen und Risse in den Katalysatorschichten sowie in den Gasdiffusionsschichten entstehen.

Wie ein wohltemperiertes System entsteht

Die Frage ist nicht, ob FCEV zu einem Kaltstart fähig sind. Die Herausforderung besteht darin, das Startprozedere bei extremen Minusgraden zu verbessern – sowohl in punkto Langlebigkeit des FCS als auch im Hinblick auf die Zeitspanne von der Zündung bis zu dem Moment, in dem der Fahrer die volle Leistung des Systems ausschöpfen kann. Bei moderaten Minusgraden ist das kein Problem. Bei Temperaturen von bis zu -30 °C muss die Brennstoffzelle jedoch sukzessive gestartet werden. In diesem Fall muss der Fahrer bis zu 60 Sekunden für den Startvorgang einkalkulieren und ungefähr weitere 60 Sekunden, bis ein Fahrzeug wie hier der FEV Versuchsträger Hyundai Nexa die volle Leistung abrufen kann.

Es gibt viele Maßnahmen, um den Kaltstart von Brennstoffzellen zu erleichtern. Dazu gehören die architektonische Op-

timierung von Stack, Zelle und MEA sowie Betriebsstrategien und externe Methoden, um den Kaltstart zu unterstützen. Für einen erfolgreichen und schnellen Start bei hohen Minusgraden werden üblicherweise all diese Strategien kombiniert, nicht zu vergessen ein effizientes Abschaltverfahren.

Eine mögliche Abschaltstrategie besteht darin, die Brennstoffzelle warm zu halten, während das Fahrzeug parkt. Das gelingt entweder durch Isolierung oder durch Dauerbetrieb, um genügend Wärme zu erzeugen und somit zu verhindern, dass der Brennstoffzellenstack gefriert. In der Praxis werden diese Maßnahmen jedoch meist nicht angewendet, weil die Parkdauer in vielen Fällen vorher unbekannt ist und Kraftstoff verschwendet wird. Deshalb wird der Stack für gewöhnlich vor dem Abschalten gereinigt, um so viel Wasser wie möglich aus der Brennstoffzelle zu entfernen. Dabei wird die Wasserstoffzufuhr abgeschaltet und der Luftstrom durch den Stapel erhöht.

Hat das Brennstoffzellensystem einen Luftbefeuchter, so wird dieser idealerweise umgangen, um die Trocknungszeit zu verkürzen. Das führt dazu, dass sich kein Eis bilden kann, bevor die Brennstoffzelle überhaupt wieder neu gestartet wird. Außerdem erhöht es die Wassermenge, die die Membran während des Kaltstarts aufnehmen kann. Sobald der Stack trocken ist, wird die Inertisierung der Kathode durch Schließen der Absperrventile eingeleitet und der Luftbefeuchter wird getrocknet, um Eisbildung in dieser Komponente zu unterbinden.

Kaltstartstrategien müssen darauf abzielen, so wenig Wärme wie möglich zu verschwenden, um das Stack schnell aufzuheizen und gleichzeitig vor Schäden durch übermäßige Eisbildung oder Abbaueffekte zu schützen. Generell kann der Stapel während des Starts entweder über den Strom oder die Spannung gesteuert werden.

Design von Stack und Zelle

Bei der Auslegung eines Brennstoffzellenstacks lässt sich bereits seine thermische Masse reduzieren, indem die verwendeten Materialien und deren Stärke sorgfältig ausgewählt werden und der Einsatz von Material generell optimiert wird. Eine geringere thermische Masse benötigt weniger Energie für das Aufheizen und erleichtert folglich den Kaltstart. Neben der Architektur eines Stacks ist ein Flow-Field-Design der Bipolarplatte, die sehr viel Wasser abscheiden kann, der Schlüssel zu einem schnellen und erfolgreichen Kaltstart.

Zu den weiteren Parameter, die sich auf das FCS auswirken, zählen die MEA: Dünnere MEA zeigen eine schnellere Wasseraufnahme. Die Membran absorbiert also das Wasser während des Kaltstarts, wodurch es nicht mehr zu Eis werden kann. Somit helfen Membranen mit höherer Wasseraufnahmekapazität auch beim Kaltstart. Allerdings können sich dünnere Membranen negativ auf die Lebensdauer der Brennstoffzelle auswirken. Es gilt, einen Kompromiss zwischen beiden Zielen zu finden.

Katalysatoren mit dickeren Schichten und höherem Ionengehalt tragen ihrerseits dazu bei, die Kaltstartzeiten zu verkürzen. Das würde allerdings durch eine höhere Edelmetallbelastung und vermutlich geringere Lebensdauer erkauft.

Der Aufbau von mikroporösen Schichten (Micro-Porous Layers, MPL) und GDL beeinflusst auch die Kaltstartfähigkeit einer Brennstoffzelle. Einerseits erleichtert der Zusatz von MPL das Entfernen von Wasser von der Oberfläche der Katalysatorschichten und erhöht so die Eiskapazität der Katalysatorschicht. Andererseits kann das Verstopfen der MPL-Poren dazu führen, dass sich Eis an der Grenze zwischen CL und MPL ansammelt und zu hohen lokalen Drücken und Schäden der Katalysatorschicht führt, zum Beispiel zu Nadellöchern und Mikrorissen.

Es gilt also, einen Zielkonflikt zu vermeiden. Hinzu kommen weitere Aspekte wie die Auswirkungen von Hoch- oder Niedrigstrommodus oder die Länge des Gaskanals, die auf die Eisbildung bei äußerst niedrigen Temperaturen ebenfalls Einfluss nimmt.

Erfolgreich gemanagte Anfahrhilfen

Durch Stromrampen lassen sich die Vorteile eines Hoch- und Niedrigstrommodus miteinander verbinden. Während der Hochlaufphase wird die Stromrampe verwendet, um das Stack behutsam zu erhitzen und gleichzeitig übermäßige Eisbildung zu verhindern. Sobald sich die Spannung der einzelnen Zellen zu stabilisieren beginnt, wird ein hohes Stromplateau aufrechterhalten, was zu einer hohen Wärmeentwicklung der Brennstoffzelle führt.

Nach dem anfänglichen Hochplateau haben sich die Zellen ausreichend stabilisiert und der Luftstrom ist verringert, um ein Austrocknen der Membran zu vermeiden. Da die Fähigkeit der Membran, Wasser aufzunehmen, jetzt zugenommen

ANFORDERUNGEN AN DAS FAHRZEUG

- Brennstoffzellen-Start bei Temperaturen bis -30 °C
- Fahrer wollen schnellstmöglich losfahren:
 - Bei Brennstoffzellenstart bei moderaten Minustemperaturen: sofort
 - Bei Brennstoffzellenstart bei sehr niedrigen Temperaturen: unter 60 Sekunden Wartezeit
- Fahrer benötigt volle Leistung bei Auffahrt auf Autobahn oder Verlassen des Stadtgebiets:
 - Verfügbarkeit der vollen Leistung innerhalb von 2 Min. nach Zündung

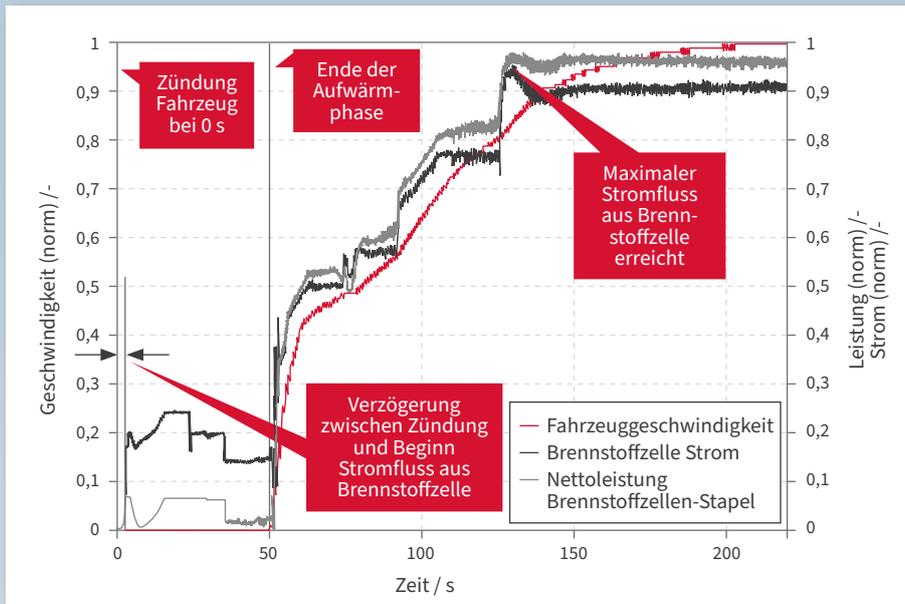
④ Einflussfaktoren auf Systemebene für die Kaltstartfähigkeit von Brennstoffzellen

hat, wird das Produktwasser absorbiert und die Eisbildung verlangsamt. Bei geringerer Leistung des Verdichters fällt der Brennstoffzellenstrom ab. Dieses Stromniveau bleibt erhalten, bis die Zellen sich weiter stabilisiert haben.

Wenn das letzte Plateau der Anfangsphase erreicht ist, sind alle Zellen stabil und zeigen untereinander nur geringe Abweichungen. Jetzt werden die Endzellenheizungen deaktiviert. Die Anfangsphase ist beendet, sobald die Temperatur, die vom elektrischen Heizer ausgeht, über dem Gefrierpunkt liegt. Vom Einschalten der Zündung bis zum Betrieb mit voller Leistung vergehen etwa 120 Sekunden.

Zuverlässige Ergebnisse mit numerischer Strömungsmechanik

Eine gewaltige Menge von Variablen greift innerhalb des Aufbaus des FCS ineinander. Daher nutzt FEV die numerische Strömungsmechanik, um einen möglichst präzisen Einblick zu gewinnen, was insgesamt der beste Aufbau für ein FCS sein könnte.



© Ablauf eines Brennstoffzellen-Kaltstarts

Die Kenntnis der genauen Geometrie ist für eine CFD-Simulation von größter Bedeutung. Die Geometrie der Brennstoffzelle muss diskretisiert werden, damit sich die Modellgleichungen, die analytisch nicht gelöst werden können, mit Hilfe der so erzeugten Gitterpunkte iterativ lösen lassen. Dafür steht jedoch nur eine begrenzte Rechnerleistung zur Verfügung, weil die notwendige Anzahl von Rechenzellen, also die Anzahl einzelner Gitterpunkte, mit zunehmender Größe und Komplexität der betrachteten Geometrie steigt. Je nach Ziel der Untersuchungen ist es deshalb nicht praktikabel, ein gesamtes Stack oder eine vollständige Zelle zu simulieren. In den meisten Fällen genügt es, einen einzelnen Gaskanal oder einen kleinen Abschnitt einer Zelle zu untersuchen.

Eine sehr starke Abstraktion der Geometrie von Stacks ermöglicht eine hohe Komplexität der Modellgleichungen. Gleichzeitig hält eine vereinfachte Geometrie der Brennstoffzelle die Anzahl der zu berechnenden Zellen und damit die Rechenzeit in vertretbaren Grenzen.

Nachdem so ein grundlegendes Verständnis aufgebaut ist, wie der Prozess der Eisbildung innerhalb der verschiedenen Schichten der Zelle abläuft, kann ein reduziertes Modell im Rahmen einer 1D-Simulation aufgebaut werden. Damit können die Betriebsstrategie für den Kaltstart optimiert und verschiedene Komponenten bewertet werden, die den Kaltstart unterstützen.

Die Vorteile der detaillierten FEV Modelle auf Zellebene für den Kaltstart liegen auf der Hand: Die analytische Vorgehensweise generiert Daten, die zur Kalibrierung eines dreidimensionalen CFD-Modells der Zelle verwendet werden können. Sie bieten weitere Einblicke in die Phänomene, die während des Kaltstarts auf Zellebene erfolgen.

Diese Analysen sind enorm wichtig, um die Zuverlässigkeit, Langlebigkeit und Effizienz von Brennstoffzellensystemen weiter zu verbessern. FEVs Ingenieure sind davon überzeugt, dass es auf Basis der Analysen noch viel Spielraum gibt, um das Brennstoffzellensystem bei tiefen Minustemperaturen noch robuster und effizienter zu machen.

Zusammenfassung

Automobile Anwendungen müssen schnelle Kaltstarts ohne Schäden erlauben. Auf Basis einer großen Datenbank und mit tiefem Wissen über Abschalt- und Kaltstartvorgänge untersucht FEV, wie ein Kaltstart am besten erreicht werden kann, ohne die Funktionsweise oder Lebensdauer des Stacks zu beeinträchtigen. Dabei zieht FEV sowohl aus 3D-CFD-Untersuchungen als auch aus 1D-Brennstoffzellen-Systemmodellen valide Schlussfolgerungen, die einen Zielkonflikt möglicher Maßnahmen umgehen.

Von

Dr. Marius Zübel · zübel@fev.com

Dr. Marius Walters · walters_m@fev.com

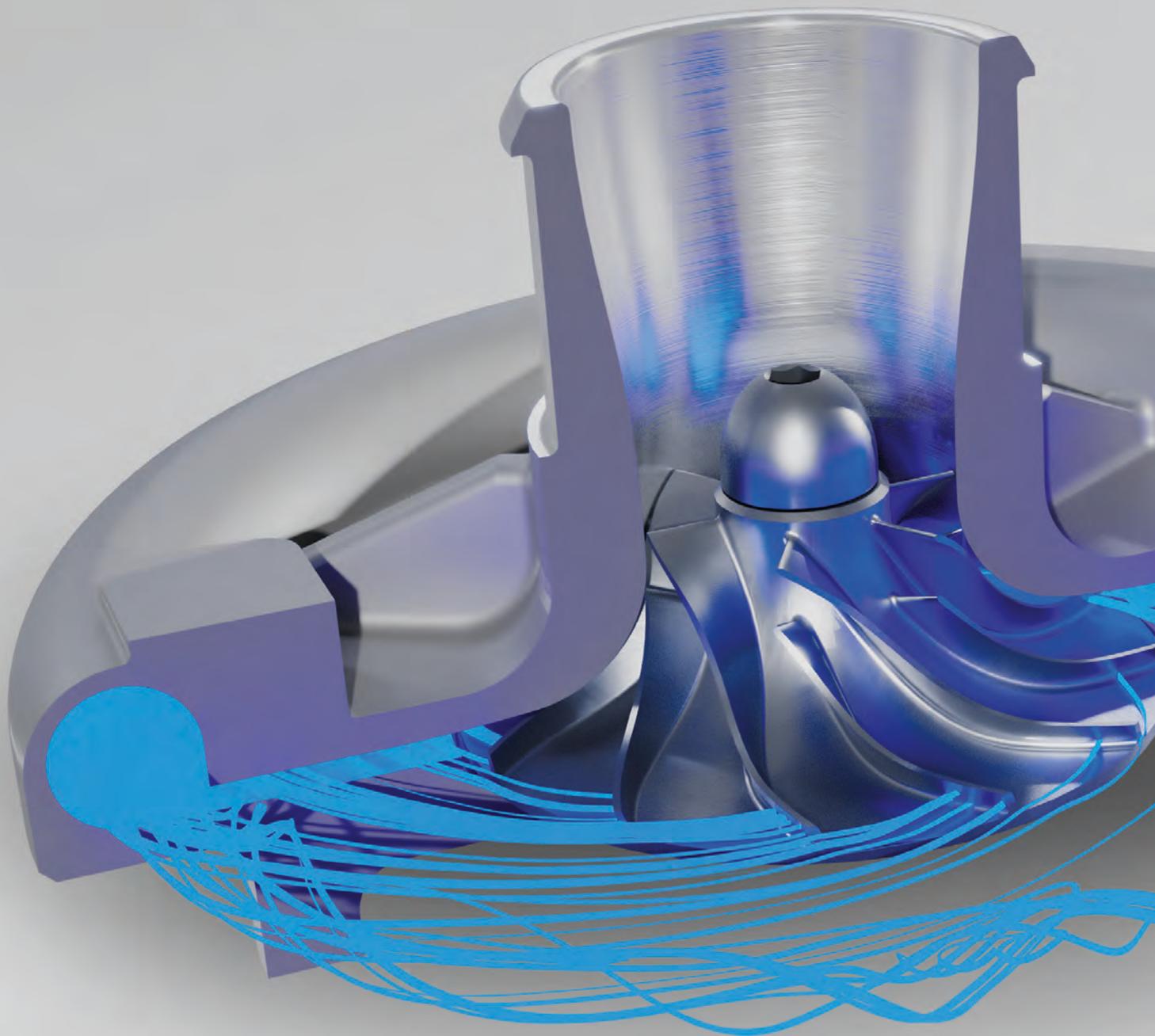
Maximilian Schmitz · schmitz_max@tme.rwth-aachen.de

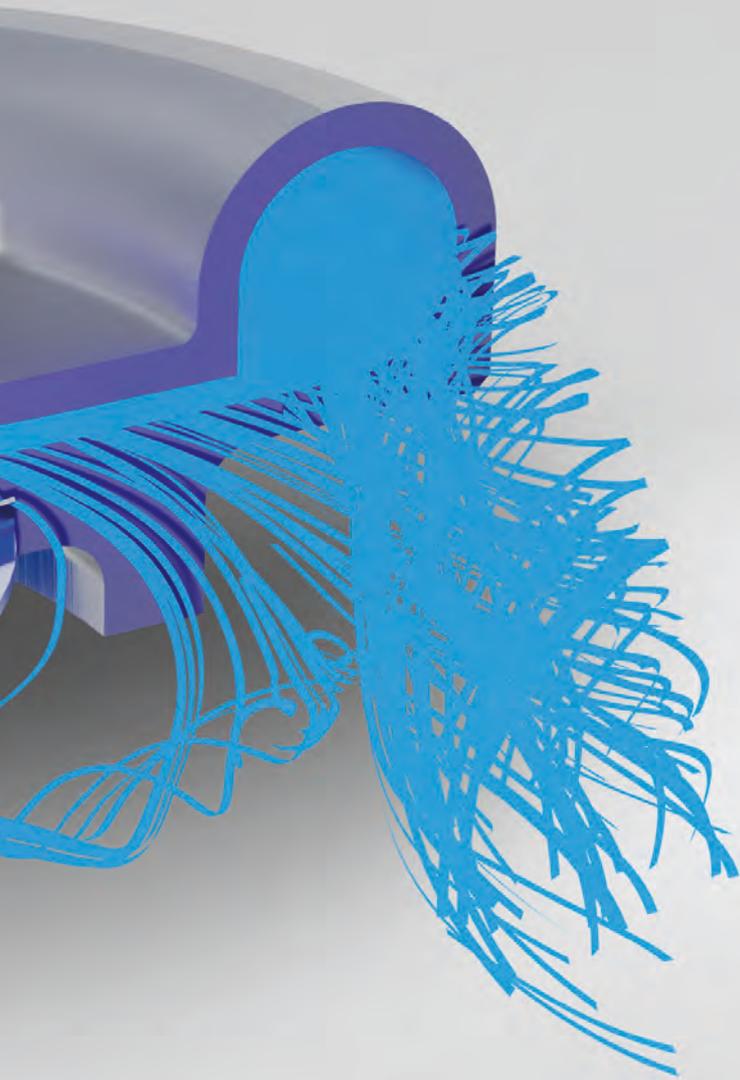
Professor Stefan Pischinger

VERDICHTERDESIGN FÜR BRENNSTOFFZELLEN

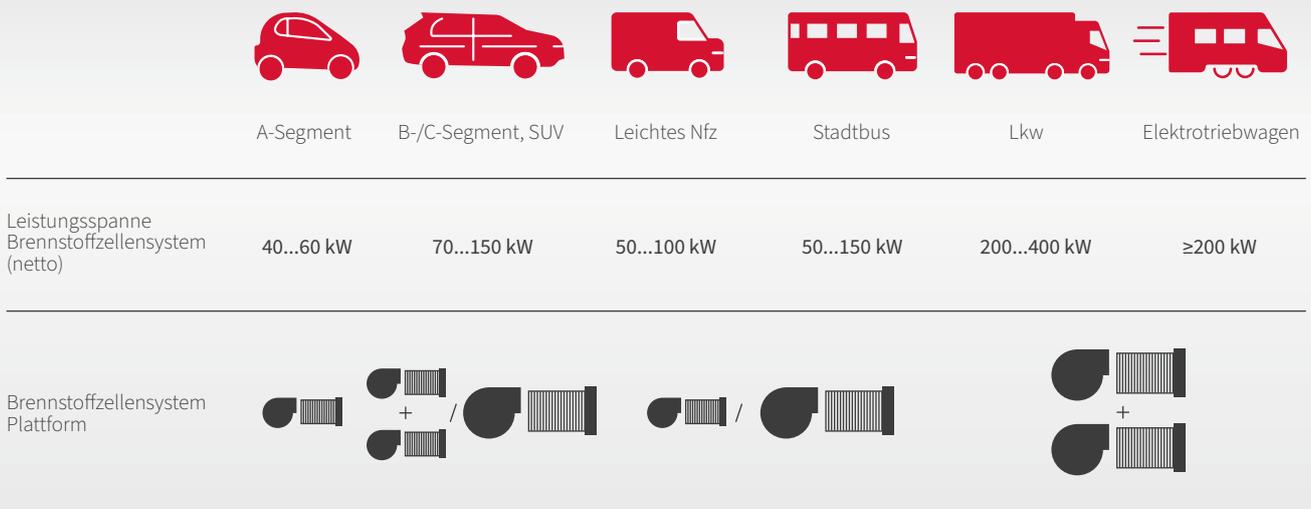
SIMULATION SENKT KOSTEN UND OPTIMIERT DIE EFFIZIENZ

Turboaufladung ist sehr sinnvoll, wenn Brennstoffzellen hohe Leistungen abgeben sollen. Da es ein breites Anwendungsspektrum gibt und in naher Zukunft nur begrenzte Stückzahlen zu erwarten sind, wird die Entwicklung maßgeschneiderter Verdichter jedoch teuer. Die Lösung ist ein ganzheitlicher Simulationsprozess, den FEV nun erstmals demonstriert hat.





Auf den Pkw-Märkten weltweit werden in den nächsten Jahren elektrifizierte Antriebsstränge eine zunehmend dominierende Rolle spielen. Elektrolytmembran-Brennstoffzellen (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEM-FC) werden insbesondere für Nutzfahrzeuge wie Schwerlast-Lkw oder öffentliche Verkehrsmittel diskutiert. Derzeit werden PEM-Brennstoffzellenantriebe jedoch überwiegend in Pkw-Anwendungen eingesetzt. Weitere Potenziale für den Einsatz von Brennstoffzellen als zentrale Energieumwandlungseinheit bestehen im Bereich der Off-Highway- und Bahnanwendungen sowie in der Luftfahrt. Bislang ist die PEM-Brennstoffzelle noch ein Nischenprodukt und konnte sich nicht im Massenmarkt etablieren.



① Skalierung von Brennstoffzellensystemen und Kompressoren für verschiedene Anwendungen

Ein Grund dafür ist die große Bandbreite der Anforderungen der oben genannten Anwendungen hinsichtlich Leistung, Lebensdauer, Größe und Gewicht. Dies könnte sich in naher Zukunft ändern: Ab 2030 wird mit der Einführung von über 60 Millionen Brennstoffzellenfahrzeugen gerechnet. Japan und Südkorea dürften die ersten Vorreiter bei der Einführung von Brennstoffzellenfahrzeugen sein, dort werden bis 2030 bereits erhebliche Marktanteile erwartet. Bei den straßengebundenen Nutzfahrzeugen wird das Segment der Schwerlast-Lkw eine wichtige Rolle spielen, beispielsweise in Europa aufgrund der strengen CO₂-Emissionsvorschriften, aber auch in Japan und Südkorea.

Die benötigte Leistung von Brennstoffzellensystemen reicht von ca. 40 kW im A-Segment (Pkw-Kleinwagen) bis zu 400 kW in Schwerlastanwendungen. Um den großen Leistungsbereich abzudecken, sind Modularisierungs- und Plattformstrategien für Brennstoffzellensysteme und deren Komponenten erforderlich.

Je nach Zeitpunkt der Markteinführung und je nach Volumen pro Anwendung eignen sich unterschiedliche Modularisierungsstrategien, um die Entwicklungs- und Herstellungskosten auszugleichen: von einem starken Modularisierungs- bis hin zu einem starken Tailoring-Ansatz.

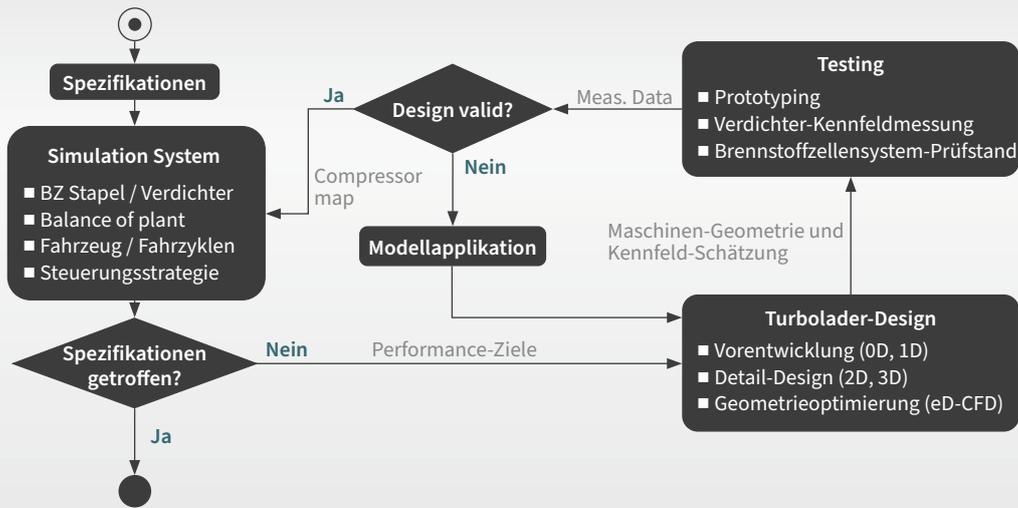
Verdichter als wesentlicher Bestandteil der Brennstoffzelle

In der Markteinführungsphase ist die Verwendung vieler Gleichteile wie etwa Luft-Verdichter für unterschiedliche

Systems eine denkbare Lösung. Mit zunehmendem Produktionsvolumen von Brennstoffzellensystemen werden spezifische Elektromotor-/Inverterplattformen der Verdichter-Turbinen-Einheit für die verschiedenen Leistungsstufen von Brennstoffzellensystemen wahrscheinlich. Zur Leistungs-optimierung müssen die Verdichter- und Turbinenräder auf die Anforderungen des jeweiligen Brennstoffzellensystems zugeschnitten werden.

Die Aufladung der Kathodenluft ermöglicht eine Erhöhung des Systemwirkungsgrads und der Leistungsdichte. Dazu werden in der Regel elektrisch angetriebene Radialverdichter eingesetzt, die anderen Bauarten in Bezug auf Effizienz, Kosten und akustisches Verhalten überlegen sind. Aufgrund der derzeit geringen Produktionsstückzahlen von Brennstoffzellensystemen steht für die Entwicklung von Luftkompressoren nur ein begrenztes Budget zur Verfügung. Folglich ist eine anwendungsspezifische Verdichterentwicklung oft nicht wirtschaftlich und unterbleibt daher.

Hier setzt die simulationsgestützte Verdichterauslegung an. Sie ermöglicht die Entwicklung maßgeschneiderter Verdichter für das jeweilige Brennstoffzellensystem oder die jeweilige Anwendung. Ein ganzheitlicher Auslegungsprozess berücksichtigt auch die Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Teilsystemen. So wird es möglich, sowohl dem Verdichter- als auch dem System- oder Antriebsstranghersteller fundierte Auslegungsziele vorzugeben. So können Entwicklungskosten und -zeit eingespart und gleichzeitig die Effizienz des Gesamtsystems gesteigert werden.



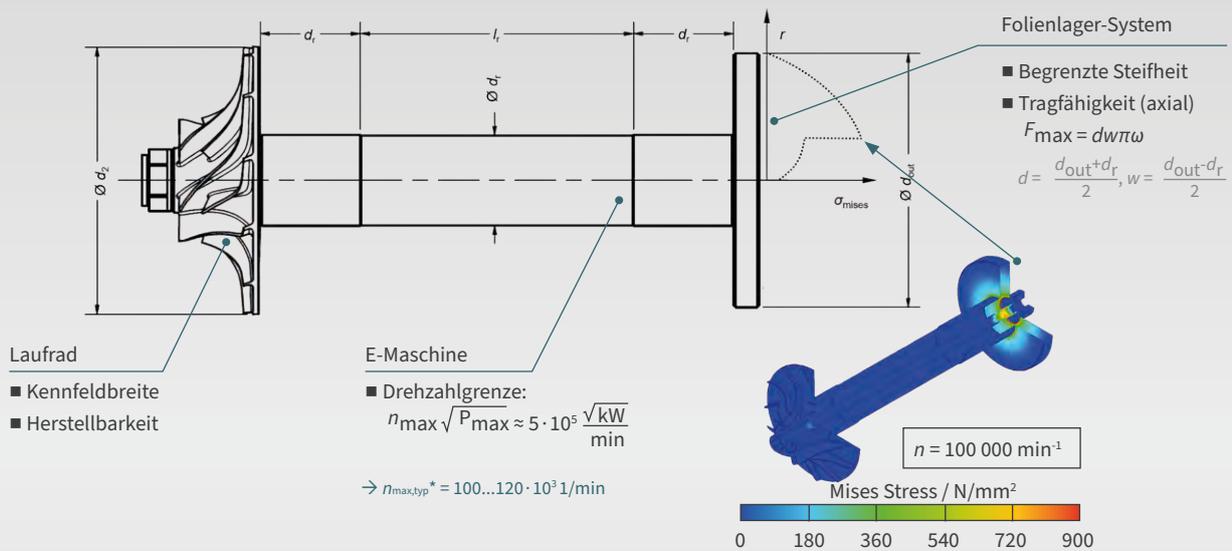
© Flussdiagramm des Entwicklungsprozesses eines Brennstoffzellenkompressors

Schritte des Verdichter-Entwicklungsprozesses

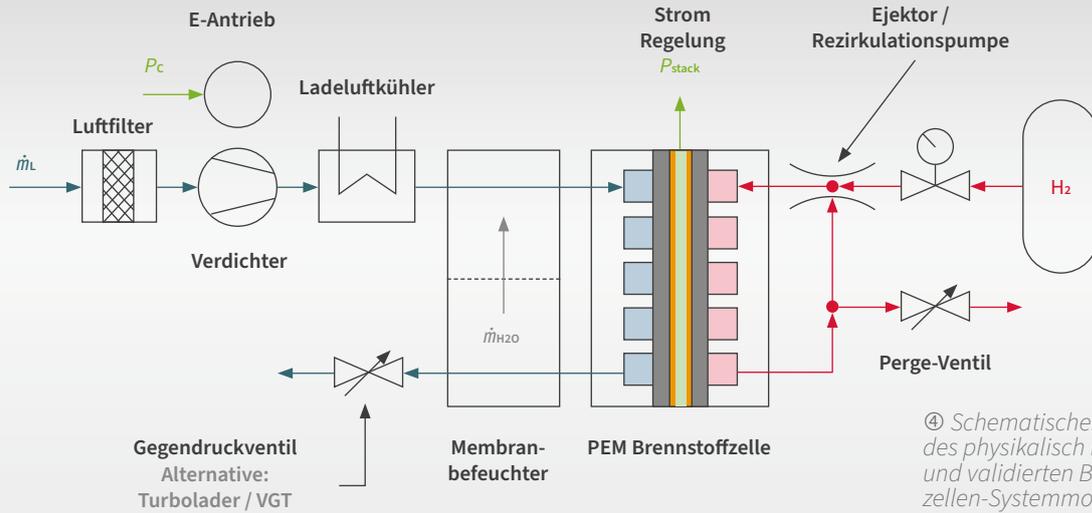
Ein ganzheitlicher Auslegungsprozess, wie ihn FEV vorschlägt, muss in einem ersten Schritt die relevanten Randbedingungen berücksichtigen. Neben hohem Wirkungsgrad und großer Kennfeldbreite (ähnlich wie beim Kfz-Turbolader) müssen Radialverdichter für Brennstoffzellenanwendungen weitere Anforderungen

erfüllen: Die maximale Betriebsdrehzahl des Verdichters wird durch die elektrische Maschine und durch das Luftlager (maximale Wurzelspannungen am Axiallager) begrenzt. Darüber hinaus muss eine gewisse elektrische Antriebsleistungsreserve für schnelle Lastwechsel vorgehalten werden.

Randbedingungen für den Designprozess



© Beispiel für Randbedingungen während des ganzheitlichen Designprozesses



In einem zweiten Schritt kann mit Hilfe eines 1D-Systemsimulationsmodells die Grundlage für die detaillierte Verdichterauslegung abgeleitet werden. Dabei wird auch das Potenzial von Turbinen untersucht.

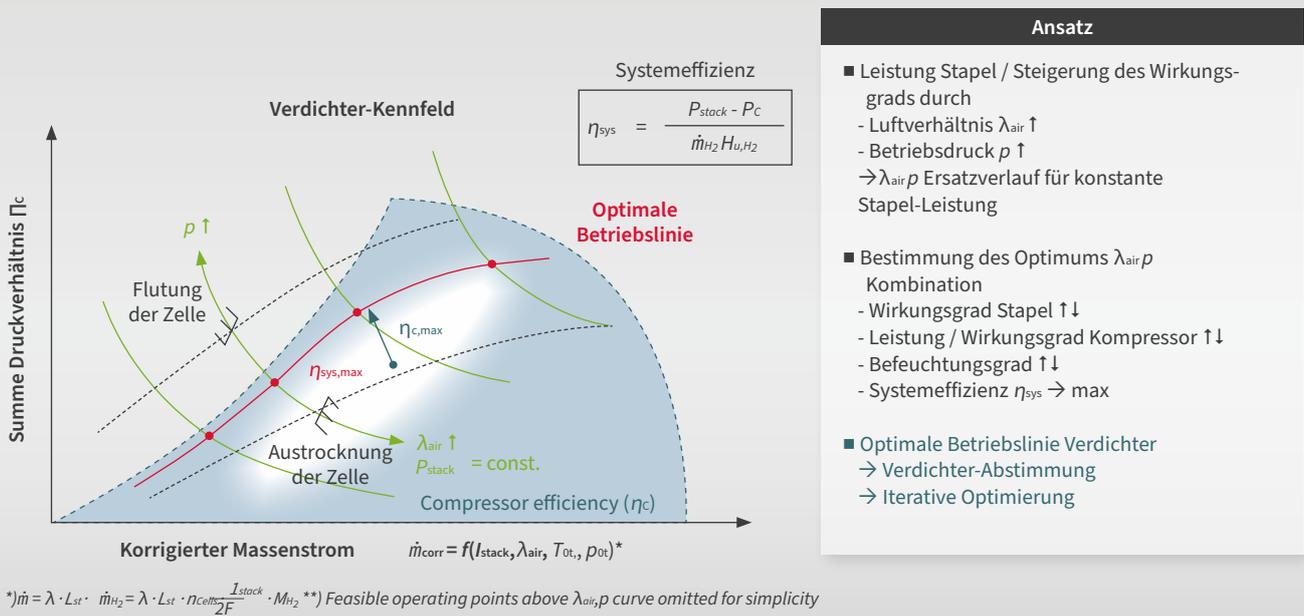
Die Randbedingungen bestehen unter anderem aus der Fahrzeugspezifikation (etwa Fahrzeugklasse, Gewicht, Fahrzyklus) und den gewünschten Eigenschaften des Brennstoffzellen-Antriebsstrangs (Zielleistung, Wirkungsgrad, Größe und Gewicht, Hybridisierung). Mit Hilfe von Brennstoffzellensystem-, Antriebsstrang- und Fahrzeugsimulationen werden diese Randbedingungen in Leistungszielwerte für den Luftkompressor übersetzt.

Nach erfolgreicher Ableitung dieser Zielgrößen kann die Verdichterstufe entsprechend ausgelegt werden. In der Vorentwurfsphase wird eine große Anzahl von Entwurfskandidaten (mehr als 1.000) mittels 1D-Stromliniensimulationen mit geringem Rechenaufwand untersucht. Die Zielgeometrie und die Meta-Parameter der Maschine werden automatisch generiert

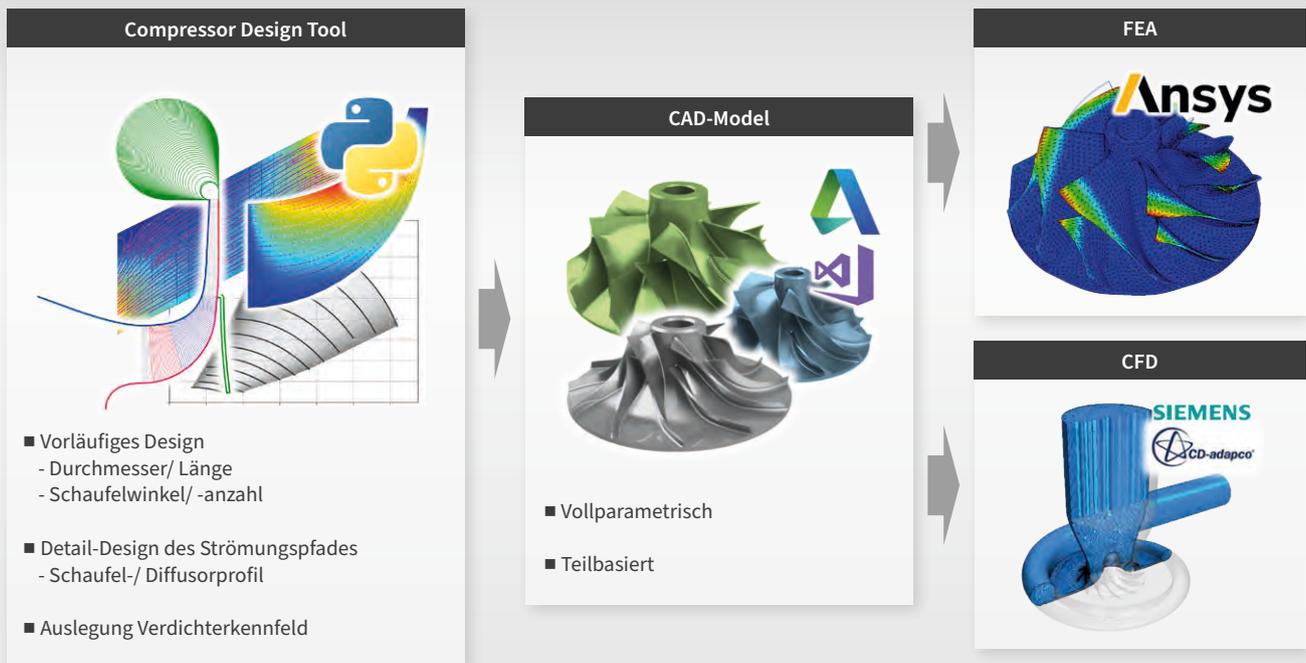
und mit Hilfe von computergestützten Optimierungsalgorithmen bewertet.

Bei der Detailkonstruktion werden die vielversprechendsten Kandidaten aus der Entwurfsphase (weniger als 100) für die Verfeinerung der Strömungsweggeometrie verwendet. Hier werden Schaufelwinkelverteilung, Diffusorkontur, Spiralförmigkeit und ähnliche Parameter festgelegt. Der letzte Entwurfsschritt ist die Geometrieverfeinerung, bei der eine begrenzte Anzahl von Lösungsmöglichkeiten (zwischen 10 und 20) mittels 3D-CFD und Finite-Elemente-Analyse untersucht wird. Dieser Schritt ist erforderlich, um die aerodynamische Leistung und die strukturelle Integrität des Detailentwurfs zu überprüfen. Vereinzelt Anpassungen, etwa an der Form der Vorderkante oder des Schaufelprofilen, optimieren Leistung und Effizienz noch einmal.

Um den Entwicklungsprozess zu beschleunigen und schnelle Iterationen zu ermöglichen, implementierte FEV die in der folgenden Abbildung dargestellte integrierte Toolchain.



⑤ Das Simulationsergebnis ist eine optimale Betriebskennlinie für die gegebenen Randbedingungen



© Integrierte Toolchain für schnelle Design-Iterationen

Die Toolchain wird von einem von FEV entwickelten Verdichtentwurfstool gesteuert. Dieses Softwarepaket ermöglicht die Geometrieerstellung, den vorläufigen Entwurf (1D-Leistungsanalyse auf der Grundlage empirischer Verlustkorrelationen und Strukturanalyse), die Durchflussberechnung (Quasi-3D-Simulation der Strömung für Einlasskonus, Rotor und Diffusor) und Reverse-Engineering (taktile und optische Rotormessung). 3D-Modelle können direkt in handelsübliche CAD- und CAE-Softwarepakete zur weiteren Verfeinerung des Entwurfs oder zur Analyse (Finite-Elemente-Analyse FEA oder numerische Strömungssimulation CFD) exportiert werden. Standardisierte Datenaustauschformate ermöglichen eine automatisierte Designoptimierung für große Musterkandidaten. Mit Hilfe parametrischer Modelle können Änderungen, die im Designtool vorgenommen werden, direkt in FEA und CFD bewertet werden.

Schließlich wird die Auslegung experimentell validiert. Prototypendesigns werden auf einem elektrisch angetriebenen Radialverdichterprüfstand getestet. Dieser ist in der Lage, das Antriebsdrehmoment des Rotors zu messen. Damit kann die aerodynamische Verdichterleistung bewertet werden. Die aufgezeichneten Messdaten werden zur Überprüfung sowohl des Turbomaschinendesigns als auch der Systemsimulation verwendet. Wenn alle Spezifikationen erfüllt sind, wird das Verdichterdiseign fertig gestellt. Andernfalls werden bestimmte Rückkopplungsschleifen über den Entwurfsprozess wiederholt, bis die Konsistenz erreicht ist.

Von

Johannes Klütsch · kluetsch_jo@fev.com
 Dr. Marius Walters · walters_m@fev.com
 Dr. Dominik Lückmann · lueckmann@fev.com

Zusammenfassung

PEM-Brennstoffzellen könnten in naher Zukunft ihre derzeitige Nischenposition verlassen und zu einer wesentlichen Technologie für die Elektrifizierung verschiedener Mobilitätsanwendungen werden - von Kleinwagen bis hin zu Nutzfahrzeugen und Zügen. Der Verdichter wird in diesem Prozess eine wesentliche Rolle spielen, da die Aufladung eine erhebliche Steigerung der Leistungsdichte und des Stack-Wirkungsgrads bei Volllast ermöglicht. Die Stackgröße (aktiver Zellquerschnitt) und die damit verbundenen Kosten können reduziert werden.

Um auch die Entwicklungskosten in Grenzen zu halten, sind simulationsgestützte Entwicklungen wichtig. Der von FEV vorgeschlagene Entwicklungsprozess zeigt einen solchen Echtzeit-Entwicklungsprozess am Beispiel eines Verdichters: Innerhalb der 1D-Systemsimulation kann das komplexe Zusammenspiel der einzelnen Komponenten fundiert bewertet werden. Gekoppelt mit der beim tme (Lehrstuhl für Thermodynamik mobiler Energiewandlungssysteme, RWTH Aachen University) und FEV entwickelten integrierten Kompressorauslegungs-Toolchain ist das anwendungsspezifische Design des Luftversorgungssystems auch bei kleinen Stückzahlen wirtschaftlich machbar. Alle Komponenten des Antriebsstrangs (u.a. Wasserstoffversorgung, Kühlsystem, Leistungselektronik) können bereits in einer frühen Entwicklungsphase optimal auf die Anforderungen des Gesamtsystems abgestimmt werden. Die Kommunikation zwischen den beteiligten Entwicklungspartnern wird unterstützt, Entwicklungszeit und -kosten können reduziert werden.

ENTER

THE NEXT LEVEL



 /companies/fevgmbh

 /showcase/fev-career



MOBILITÄT VERBINDET MENSCHEN. MENSCHEN GESTALTEN MOBILITÄT.

Mit über 6.300 Mitarbeitern weltweit entwickeln wir zukunftsweisende und effiziente Antriebssysteme, wir vernetzen Fahrzeuge miteinander und mit ihrer Umwelt und arbeiten daran, unser Leben mit intelligenten Systemen sicherer zu machen. Dazu brauchen wir die richtigen Leute am richtigen Ort. Menschen, die aus Visionen Realität werden lassen, die über den Tellerrand schauen und Innovationen vorantreiben. Menschen die bereit sind, Grenzen zu verschieben.



JOIN THE FEV TEAM
www.fev.com/karriere

DEFOSSILISIERUNG

WASSERSTOFF KANN SAUBERE VERBRENNER WAHR MACHEN

Mit dem Ziel des emissionsfreien Straßenverkehrs ist Wasserstoff (H₂) wieder in den Fokus der Öffentlichkeit gelangt, insbesondere bei Nutzfahrzeugen. Und es bietet sich an, diesen kohlenstofffreien Energieträger neben der Brennstoffzelle auch für Verbrennungsmotoren zu nutzen. Das aber macht Abgasnachbehandlungssysteme für Stickoxid erforderlich. FEV hat erforscht, welche davon am besten für die Praxis geeignet sind.





Für emissionsfreie Lkw und Busse im Langstreckeneinsatz zählt Wasserstoff zu den besten Lösungen. Er beinhaltet keinen Kohlenstoff und kann in Fahrzeugen auf zwei technologische Arten zum Einsatz kommen: Indem er – vergleichbar mit fossilem Diesel – einen modifizierten Verbrennungsmotor (Hydrogen Internal Combustion Engine, H₂-ICE) „befeuert“ oder indem er in einer Brennstoffzelle wirkt, die ihn in Strom für einen Elektromotor wandelt. Im Vergleich ist der H₂-ICE robuster und kommt auf die höhere Lebensdauer, was beides sehr wichtige Kriterien für Nutzfahrzeuganwendungen sind. Entsprechende Kleinserienfahrzeuge gab es bereits Anfang der 2000er-Jahre. Diese waren jedoch in Bezug auf die spezifische Leistung (Motorleistung im Verhältnis zum Hubraum) nicht wettbewerbsfähig. Dieses Manko kompensieren seit Langem schon Aufladungen, also Turbolader oder Kompressoren.

Der einzige Schadstoff, der bei einem H₂-ICE eventuell noch signifikant hohe Werte erreichen kann, ist Stickoxid (NO_x). Gingen auch diese Emissionen gen Null, ohne dass andere – insbesondere sekundäre wie „Lachgas“ (N₂O) und Ammoniak (NH₃) – zunehmen, ergäbe der Wasserstoffverbrennungsmotor ein belastbares „grünes“ Konzept. Dieses Ziel lässt sich vor allem dadurch erreichen, dass Systeme zur Abgasnachbehandlung (AGN) sowie durch begleitende Maßnahmen die verbliebenen Auspuffemissionen beseitigen. FEV hat analysiert, welche Kombinationen dieser Technologien sich am besten dazu eignen. Als Grundlage diente den Experten eine 7,7-Liter-CNG-Maschine, die zu einem Wasserstoffmotor umgebaut wurde: Neben Modifikationen an der Einspritzung ersetzte ein zweistufiger Turbolader den einstufigen.

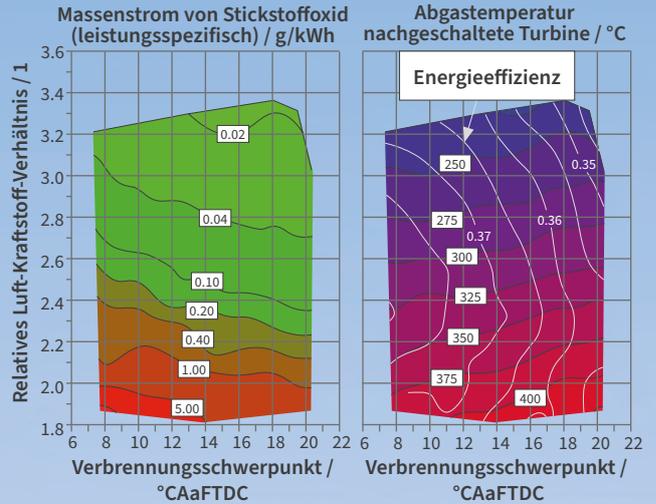
Die Hürden der Abgasnachbehandlung für einen H₂-ICE kennen

In der Untersuchung wurde das NO_x-Ziel auf maximal 69 mg/kWh festgelegt. Dies entspricht 15 Prozent des aktuellen Grenzwerts von 460 mg/kWh, den die Euro-VI-Norm im WHTC vorgibt (World Harmonized Transient Cycle, ein Prüfstands-Abgastest zur Zertifizierung von schweren Nutzfahrzeugen). Sämtliche Prüfungen sind von FEV mit den offiziellen Verfahren vergleichbar.

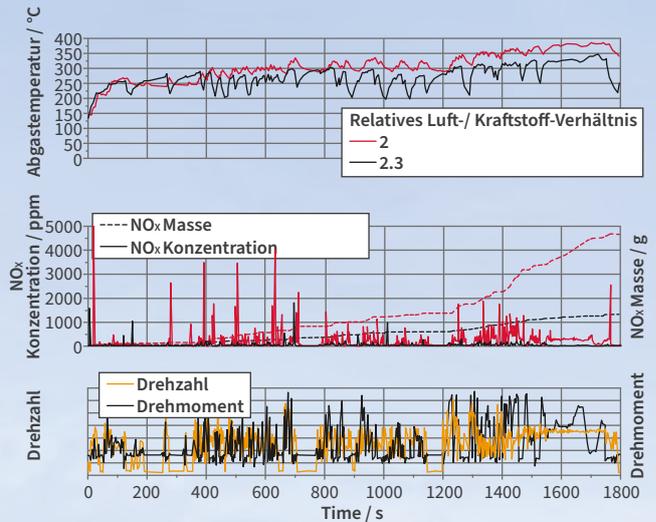
Die Schadstoffausstoß eines H₂-ICE hängt – wie der eines jeden Verbrenners – hauptsächlich von den Motorrohmissionen und der Effizienz des AGN-Systems ab. Das Luft-Kraftstoff-Verhältnis (λ) beeinflusst den NO_x-Ausstoß des Motors stark. Die wichtigsten Faktoren für die Effizienz des Nachbehandlungssystems sind die Abgastemperatur, der Massenstrom und die Abgaszusammensetzung.

Die Messungen zeigen nun erstens die Abgastemperatur hinter dem Turbolader, zweitens die NO_x-Emissionen am Motorausgang und zusätzlich den Motorwirkungsgrad abhängig vom Luft-Kraftstoff-Verhältnis und der Verbrennungsschwerpunktlage bei konstantem Betriebspunkt (1.400 U/min, 8 bar). Tatsächlich beeinflusst das Luft-Kraftstoff-Verhältnis alle drei Faktoren maßgeblich.

Im Magerbetrieb (geringerer Kraftstoffanteil) lassen sich die NO_x-Emissionen sehr deutlich reduzieren und die Abgastemperatur sinkt. Der Wirkungsgrad des Motors zeigt ein Optimum bei etwa $\lambda = 2,3$. Der Versuch, die NO_x-Emissionen allein durch interne Maßnahmen fast gänzlich zu eliminieren, erhöhte jedoch den Verbrauch und verschlechterte das Ansprechverhalten. Eine Kalibrierung, die auf einen möglichst geringen Kraftstoffverbrauch abzielt, ergäbe dagegen moderate NO_x-Emissionen und Abgastemperaturen. Diesen Ansatz – kombiniert mit einem effektiven AGN-System – zu wählen, erscheint daher.



① Vergleich der spezifischen NO_x-Emissionen, der Abgastemperatur hinter dem Turbolader und dem Motorwirkungsgrad in Abhängigkeit vom Luft-Kraftstoff-Verhältnis und von der Verbrennungsschwerpunktlage

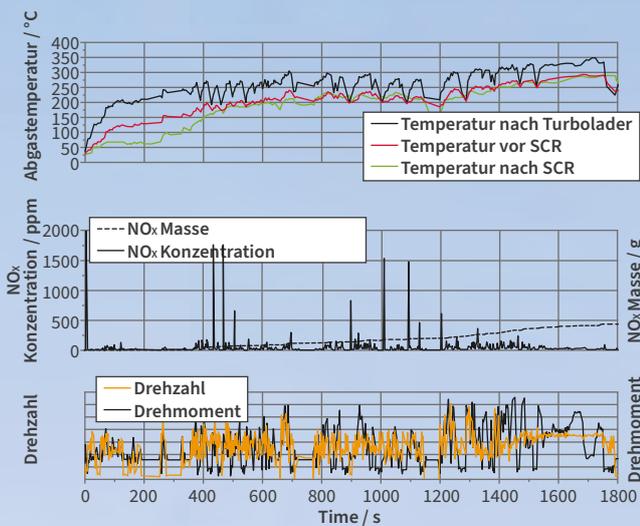


② Vergleich der Abgastemperatur hinter dem Turbolader sowie der NO_x-Emissionen des Motors im WHTC für verschiedene Luft-Kraftstoff-Verhältnisse

Eine größere Herausforderung als der oben beschriebene stationäre Betriebspunkt ist der instationäre. Deshalb prüfte auch FEV verschiedene Warm- und Kaltläufe gemäß WHTC.

Die Abgastemperaturunterschiede zwischen den Läufen reichten von 20 °C bis 50 °C. In diesem Aspekt lässt sich also ein Vorteil erkennen. Das verschlechterte Luft-Kraftstoff-Verhältnis jedoch erhöht die NO_x-Emissionen um den Faktor 3,5.

Die instationären Tests ergaben auch hohe NO_x-Spitzen. Es kam zu mehr als 5.000 ppm (Teile pro Million, parts per million) bei $\lambda = 2$ (gegenüber nur 50-250 ppm stationär) sowie zu 2.000 ppm bei $\lambda = 2,3$ (im Vergleich zu 10-40 ppm stationär). Mit Blick auf einen Katalysatorbetrieb sind niedrigere NO_x-Emissionen des Motors von größerem Vorteil als eine Temperaturerhöhung. Daher wurde auch für die Suche nach dem geeignetsten AGN-System $\lambda = 2,3$ gewählt, insbesondere für die Tests mit der selektiven katalytischen Reduktion (SCR).



© Abgastemperaturen und NO_x-Emissionen des Motors im WHTC kalt

Aufwärmen mit Kat

Die größte Herausforderung, die Emissionen des H₂-ICE in die Nähe von null zu bringen, ist die Aufwärmphase.

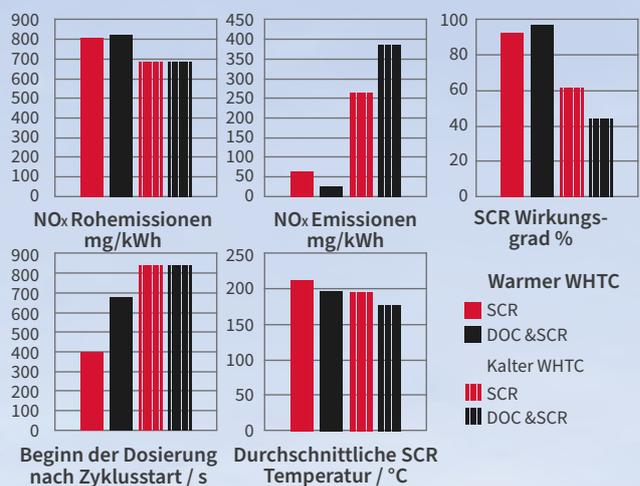
Die anschließenden FEV Messungen (siehe Abbildung 3) erfolgten mit installiertem SCR, aber ohne weitere Systeme. Die Aufheizzeit bis zum Start der Dosierfreigabe beträgt etwa 600 Sekunden. Es gibt Möglichkeiten, diese Phase zu umgehen und die NO_x-Emissionen bereits bei diesen niedrigen Temperaturen zu verringern. Dazu zählen zum Beispiel gesonderte Motoraufheizfunktionen, eine elektrische Abgasheizung oder ein passiver NO_x-Speicherkatalysator (NO_x Storage Catalyst, NSC). Letzterer sammelt das NO_x während des Aufheizens und gibt es thermisch ausgelöst erst ab, wenn der SCR die Betriebstemperatur erreicht hat und gegen diese Emissionen wirken kann.

Um zunächst zu untersuchen, wie gut ein SCR für einen Wasserstoffverbrennungsmotor im Allgemeinen geeignet ist, verglich FEV zwei verschiedene Anordnungen: die reine SCR-Konfiguration und deren Kombination mit einem Dieseloxidationskatalysator

(DOC). Letzterer dient allen voran dazu, das NO₂-NO_x-Verhältnis vor dem SCR zu erhöhen. Das verbessert den Wirkungsgrad der Stickoxidreduktion insbesondere bei niedrigeren Temperaturen. Die Ergebnisse zeigt Abbildung 4.

Die Abgasemissionen des H₂-ICE am Motorausgang liegen damit gegenüber Nfz-Dieselmotoren auf relativ niedrigem Niveau (~0,8 g/kWh). Da die Kalibrierung nur für den warmen Betrieb optimiert wurde, treten in der Kaltstartphase etwas höhere Luft-Kraftstoff-Verhältnisse auf. Dann ist die NO_x-Reduktion gering. Die Auspuffemissionen im warmen Zyklus sind in beiden Konfigurationen sehr niedrig, sie erreichen nur 62 mg/kWh und 24 mg/kWh. Der zusätzliche DOC erhöht das NO₂-NO_x-Verhältnis vor dem SCR und damit dessen Wirkungsgrad: Die SCR-Einzellösung erreicht 92 Prozent, die DOC-SCR-Kombination sogar 97 Prozent.

Der kalte Zyklus jedoch führt zu einem anderen Ergebnis: Mit beiden Katalysatoren gemeinsam sind die Auspuffemissionen höher und der SCR-Wirkungsgrad geringer als bei der alleinigen SCR-Konfiguration. Die Dosierfreigabe beginnt fast 200 Sekunden später, und die durchschnittliche Temperatur vor dem SCR liegt 15 °C niedriger. Im warmen Zyklus war das bessere NO₂-NO_x-Verhältnis vorteilhafter als das schnellere Aufheizen. Im Kaltlauf gilt das nicht. Noch wichtiger aber: Die Ergebnisse



④ NO_x-Emissionen am Ausgang von Motor und Endrohr, SCR-Wirkungsgrad, Beginn der Dosierfreigabe und durchschnittliche Temperatur vor dem SCR in einem warmen und einem kalten WHTC; Ergänzend gezeigt ist der Vergleich der reinen SCR-Konfiguration mit der DOC-SCR-Anordnung

des kalten WHTC zeigen, dass – unabhängig von einem DOC – in der Aufheizphase eine zusätzliche Lösung erforderlich ist, um einen nahezu emissionsfreien H₂-ICE möglich zu machen.

Der NO_x-Speicherkatalysator sorgt für den sauberen Abschluss

Hier kommt der bereits erwähnte NSC ins Spiel. In Konzeptsimulationen analysierte FEV, wie sich dieser auf einen H₂-ICE im Magerbetrieb auswirkt. Ein Ziel war, den NSC ausschließlich passiv zu regeln. Das bedeutet, dass allein Temperatur die Desorption auslösen soll. Ein erstes Untersuchungsergebnis: Die Abgastemperatur ist bei niedriger Last auf relativ hohem Niveau. In den meisten realen Betriebsfällen werden also 300-350 °C erreicht.

Insgesamt wurden vier verschiedene Katalysatormuster (von Dinex) unter die Lupe genommen, um zu sehen, wie sie sich unter passiven Bedingungen verhalten: ein überarbeiteter Drei-Wege-Kat (Modified Three-Way Catalyst, MTWC), angepasste aktive NO_x-Speicherkatalysatoren (Modified Active NO_x Trap Catalysts, MANTC) in zwei Ausführungen (MANTC-1 und MANTC-2) sowie ein modifizierter passiver Adsorber (MPA).

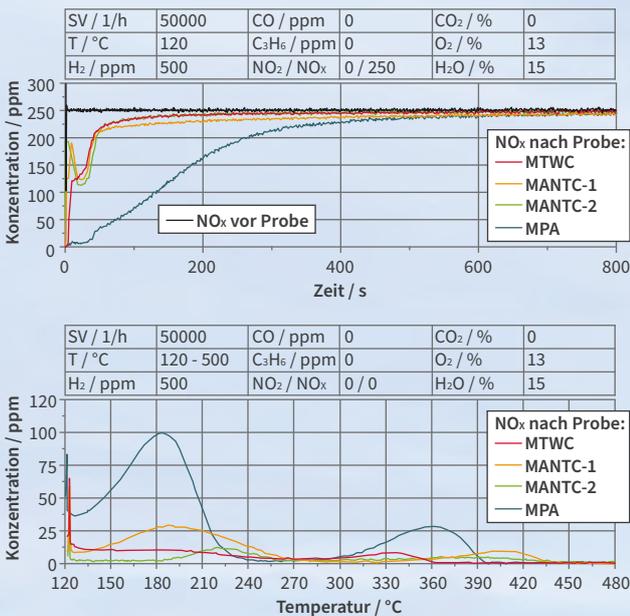
Analysen aller Muster auf dem Gasprüfstand bildeten die Eingabedaten (Abbildung 5 und 6) für das Simulationsmodell. MTWC, MANTC-1 und MANTC-2 wiesen sehr ähnliche Adsorptionsverhalten auf: Sie zeigen eine anfängliche Desorption und eine stark abnehmende Effizienz nach nur 20 Sekunden. Der MPA adsorbiert wesentlich länger hocheffizient. Auch was die Gesamtkapazität und -effizienz bei der NO_x-Speicherung betrifft, ist dieser den anderen drei Katalysatoren deutlich überlegen.

Der MTWC gibt den größten Teil des adsorbierten NO_x unter 240 °C frei. Eine zweite Desorptionsspitze weist er bei etwa 330 °C auf. Der MANTC-1 desorbiert das meiste NO_x während eines ersten Peaks bei etwa 190 °C. Der MPA erreicht hier die früheste niedrigste Spitze, nämlich bereits bei 180 °C. Der MANTC-2 dagegen agiert später, konkret bei etwa 225 °C. Was Wasserstoffmotoren betrifft, sind es auch die beiden letztgenannten, die das größte Potenzial für gute Ergebnisse bieten: Die hohe Speicherkapazität des MPA ist ebenso vorteilhaft wie die späte Desorption des MANTC-2. Daher zog FEV diese beiden für die Simulationen heran.

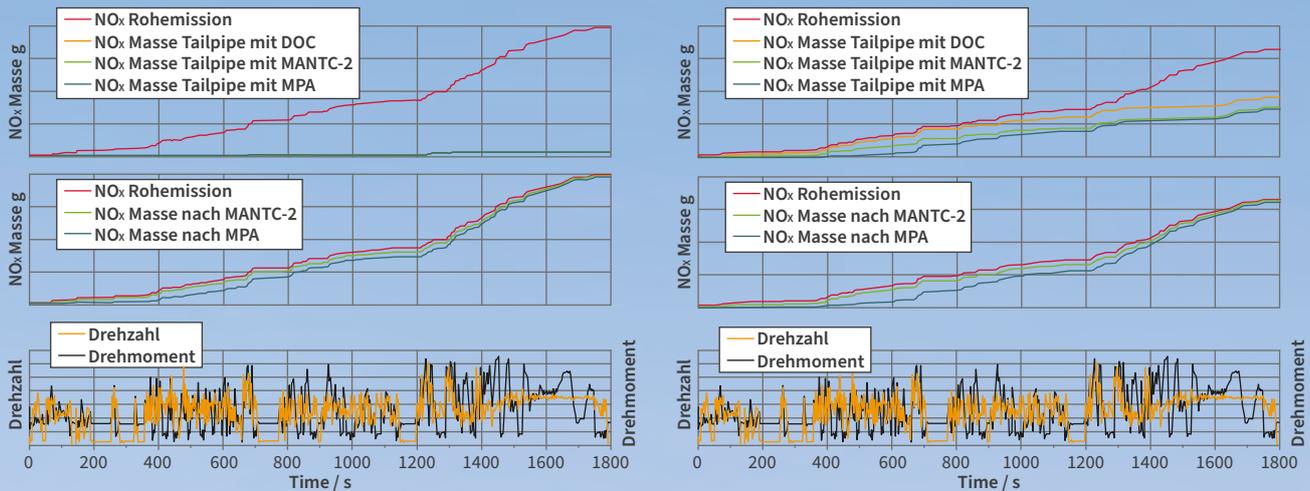
Diese erfolgten erneut für den warmen und kalten WHTC. Zunächst wurde die DOC-SCR-Messung während des warmen WHTC für folgende drei Konfigurationen durchgeführt: ohne Adsorber, mit einem MANTC-2 und mit einem MPA (siehe Abbildung 7). Der Einfluss eines NSC ist hier für beide simulierten Katalysatoren zu vernachlässigen: Aufgrund der hohen SCR-Effizienz bringt der Adsorber in diesem Zyklus weder Vor- noch Nachteile.

Im kalten WHTC aber kam es mit beiden simulierten Katalysatoren zu klaren Verbesserungen gegenüber der DOC-SCR-Messung. Sie erzielen ähnlich gute Ergebnisse am Endrohr: Die NO_x-Emissionen können damit in diesem Zyklus von 385 mg/kWh auf 320 respektive 309 mg/kWh sinken. Für die gewichteten Ergebnisse bedeutet das einen Rückgang von 75 mg/kWh auf 65 mg/kWh bzw. auf 64 mg/kWh. Der durchschnittliche DeNO_x-Wirkungsgrad stieg für den kalten WHTC von ursprünglich 44 Prozent auf 54 Prozent für den MANTC-2 und auf 55 Prozent für den MPA.

Der SCR wurde nicht auf höchsten, sondern auf hohen Wirkungsgrad kalibriert, ohne dass ein nennenswerter NH₃-Schlupf auftritt. Insbesondere wenn, um einer Lachgasbildung vorzubeugen, ein Schlupfkatalysator nicht Teil des AGN-Konzepts ist, wird die Aufheizphase zur großen Herausforderung. Ein passiver NO_x-Adsorber kann zur Emissionsreduktion beitragen.



⑤⑥ Adsorption von NO_x bei 120 °C (oben) und Desorption über die Temperatur (unten) für vier verschiedene Katalysatoren



⑦ ⑧ Kumulierte NO_x-Massen im warmen (links) und kalten (rechts) WHTC, jeweils im Vergleich ohne Adsorber, mit einem MANTC-2 und mit einem MPA (Simulationen)

Die Ergebnisse verdeutlichen außerdem, wie stark NO_x-Emissionen, Abgastemperatur und das Luft-Kraftstoff-Verhältnis voneinander abhängen. Darin steckt großes Potenzial für eine optimierte Kalibrierung, die den AGN-Systemstatus berücksich-

tigt. Ein sauberer Wasserstoff-Verbrennungsmotor erfordert es also, die Verbrennung und Nachbehandlung aufeinander abzustimmen; und zwar während der Konstruktion, der Kalibrierung und des Betriebs.

Zusammenfassung und Ausblick

Damit der H₂-ICE als Alternative zu batterieelektrischen oder Brennstoffzellen-Antrieben immer besser wird, muss er sehr niedrige Schadstoffwerte erreichen. FEV Simulationen zeigen: Die Kombination eines passiven NSC mit einem SCR ermöglicht dies. In weiteren Schritten gilt es nun, dieses Konzept unter Realbedingungen und unter Umgebungsbedingungen als geeignete Lösung zu validieren. Die Alterung bei hoher Wasserkonzentration muss ebenfalls noch im Detail untersucht werden. Dasselbe gilt für eine mögliche NSC-Temperaturregelung, damit keine aktive Regeneration notwendig wird.

Eine präzise Dosiersteuerung, die bei Ungenauigkeiten oder Abweichungen korrigieren kann, ist ebenfalls nötig. Bestehende Lösungen sind daher möglicherweise zu verbessern oder zu erweitern. Auch die Sensorgenauigkeit muss weiter

steigen. Dies kann sowohl das NH₃-Schlupfrisiko als auch die Notwendigkeit eines Ammoniak-Schlupfkatalysators verringern. Dieser könnte schließlich N₂O bilden – einen Schadstoff, den es generell zu vermeiden gilt. Im Zylinder verbranntes Schmieröl kann Rußpartikel verursachen. Und obwohl diese, wenn überhaupt, nur in sehr geringen Mengen auftreten, könnte sich die Frage nach einem Partikelfilter stellen.

Doch selbst wenn noch nicht alle AGN-Möglichkeiten bis ins Detail ausgeschöpft sind: Als gut und sinnvoll erweist sich der H₂-ICE bereits heute, insbesondere für Langstrecken-Lkw und für Offroad-Einsätze. Dort planen Hersteller entsprechend frühe Markteinführungen. Die Wasserstoff-Verbrenner, die für 2023 und 2024 angekündigt sind, werden daher mit nur wenig Feinschliff schon sehr sauber sein.

Von

Dr. Verena Huth · huth_v@fev.com

Dr. Lukas Virnich · virnich@fev.com

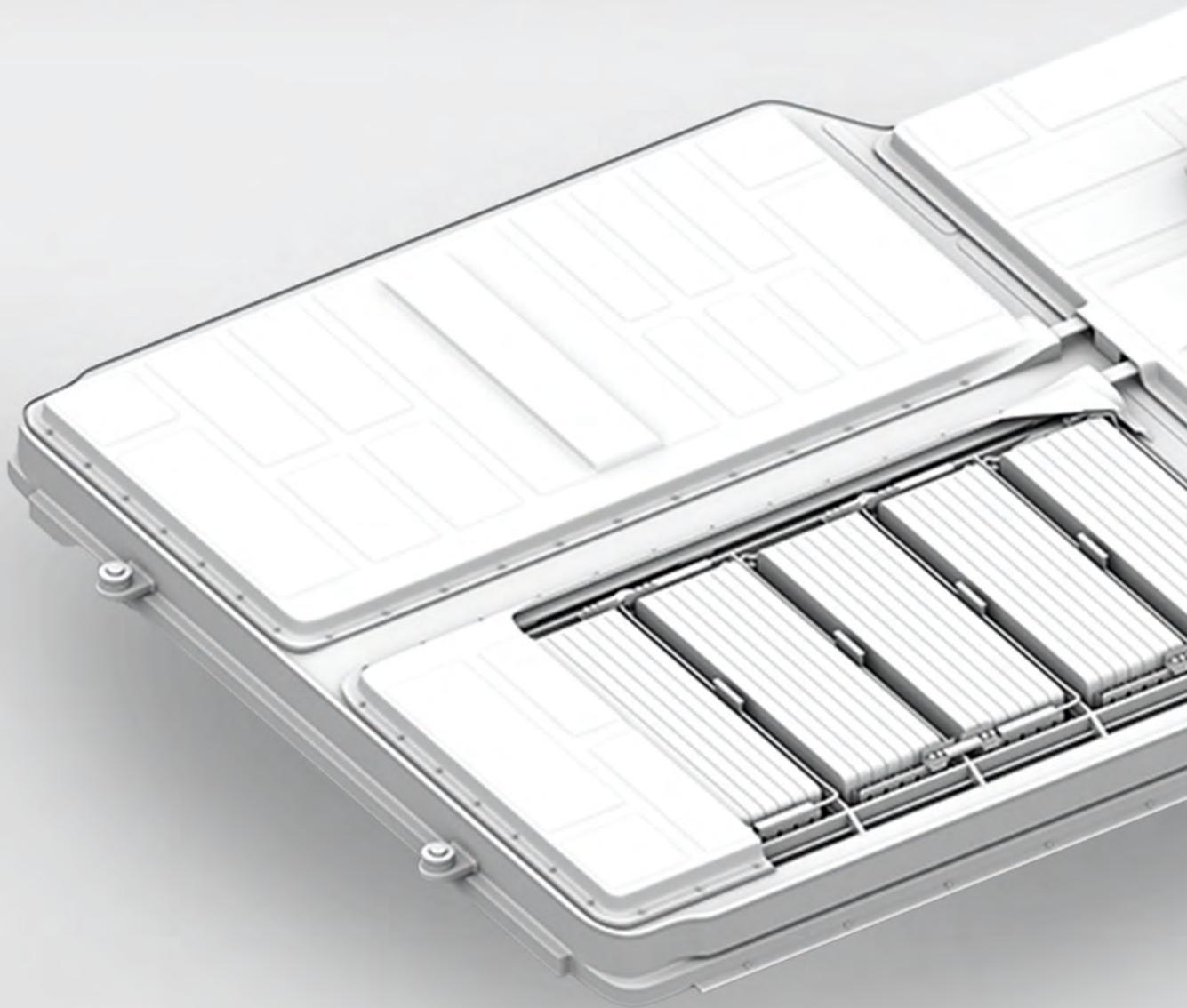
Stefan Sterlepper · sterlepper_s@tme.rwth-aachen.de

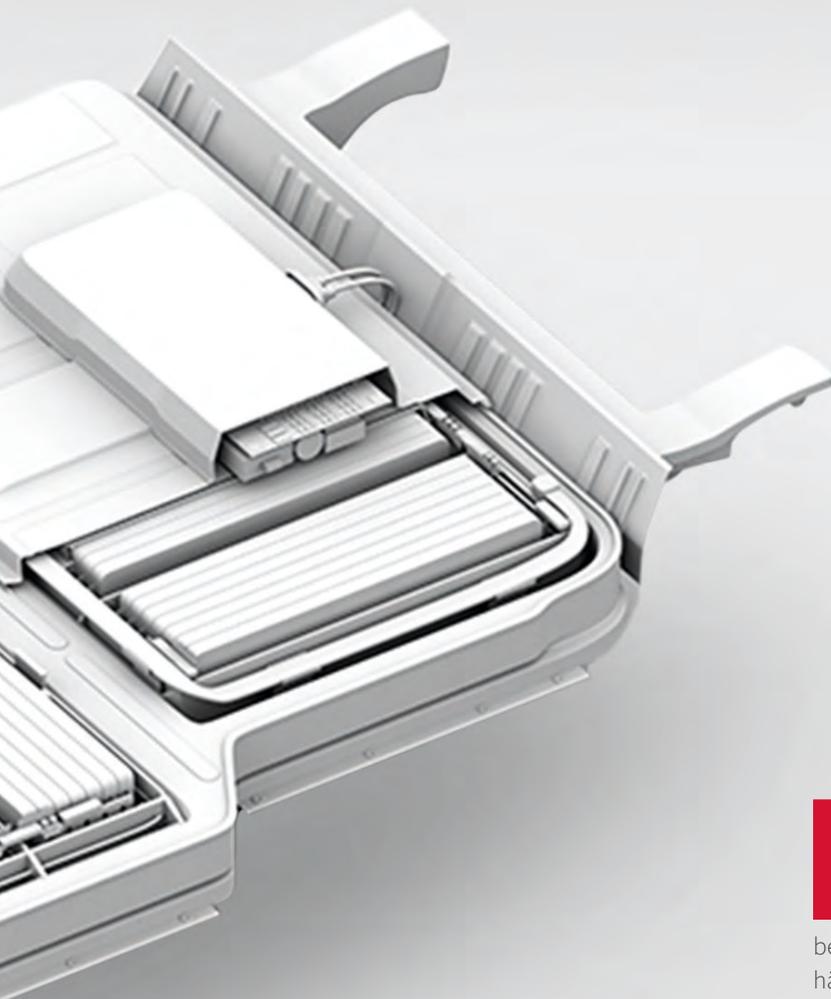
Professor Stefan Pischinger

STROMSPEICHERUNG BEI BEVS

FEV DECKT BATTERIE-MEGATRENDS VON MATERIALVIELFALT ÜBER SICHERHEIT BIS HIN ZUR ENERGIEDICHTE AB

Elektroautos sind für die Defossilisierung der Mobilität unerlässlich. Und Lithium-Ionen-Batterien gelten als die technologische Speerspitze der Elektrifizierung. Doch damit diese breiter als bisher akzeptiert werden, ist laufende Weiterentwicklung nötig. Dabei geht es zum Beispiel um höhere Energiedichten und schnelleres Laden. Gleichzeitig muss der Energiegehalt in Einklang mit den steigenden Sicherheitsstandards wachsen. Was also sind die vielversprechenden neuen Ansätze für bessere Batterieeigenschaften, an welchen Stellschrauben kann man auf Ebene der Zell-, System- und Fahrzeugintegration drehen? FEV hat Antworten.





Heute herrscht weitgehend Einigkeit darüber, dass die Elektrifizierung des Straßenverkehrs notwendig ist, um künftige CO₂-Ziele zu erreichen. Das batterieelektrische Fahrzeug (Battery Electric Vehicle, BEV) spielt bei dieser Transformation eine zentrale Rolle. Sein Erfolg aber hängt weitgehend vom Energiespeicher an Bord ab: Vor allem die Batterie bestimmt bei diesem Fahrzeugtyp die Reichweite, den Preis und das Gewicht. Sie beeinflusst außerdem, wie gut das Fahrzeug auf der Straße sowie beim Laden performt. Daher arbeitet die Industrie mit Hochdruck an neuen Zellen und Zellchemien. Das wird Batterien mit deutlich höherem Energiegehalt ermöglichen. Laufend strengere Sicherheitsstandards müssen diese dennoch erfüllen. Sogar eine tragende Rolle im Chassis könnten Batterien übernehmen. FEV analysierte nun auf Zell- und Pack-Ebene, welche aktuellen und zukünftigen Batterietechnologien sowie Entwicklungsansätze das alles möglich machen.

Die Zellvielfalt steigt

Materialien und Zellen werden immer günstiger, die Kosten für Batterien könnten schneller sinken als vorhergesagt. Gleichzeitig sind die Fahrzeuganforderungen in den vergangenen Jahren stark gewachsen, etwa hinsichtlich Reichweite und Ladezeit. Die Materialien richtig zu wählen und aufeinander abzustimmen sowie zugleich die Zellfertigung zu optimieren und feinzutunen, das sind zentrale Hebel, um die wichtigsten Eigenschaften einer Batteriezelle zu beeinflussen: zum Beispiel die Sicherheit, Nachhaltigkeit, Kosten, Lebensdauer und Leistungsfähigkeit sowie den Energiegehalt. Viele dieser Kriterien werden hauptsächlich von den Kathodenmaterialien beeinflusst. Und diese machen fast 40 Prozent der Rohstoffpreise einer Batteriezelle aus.

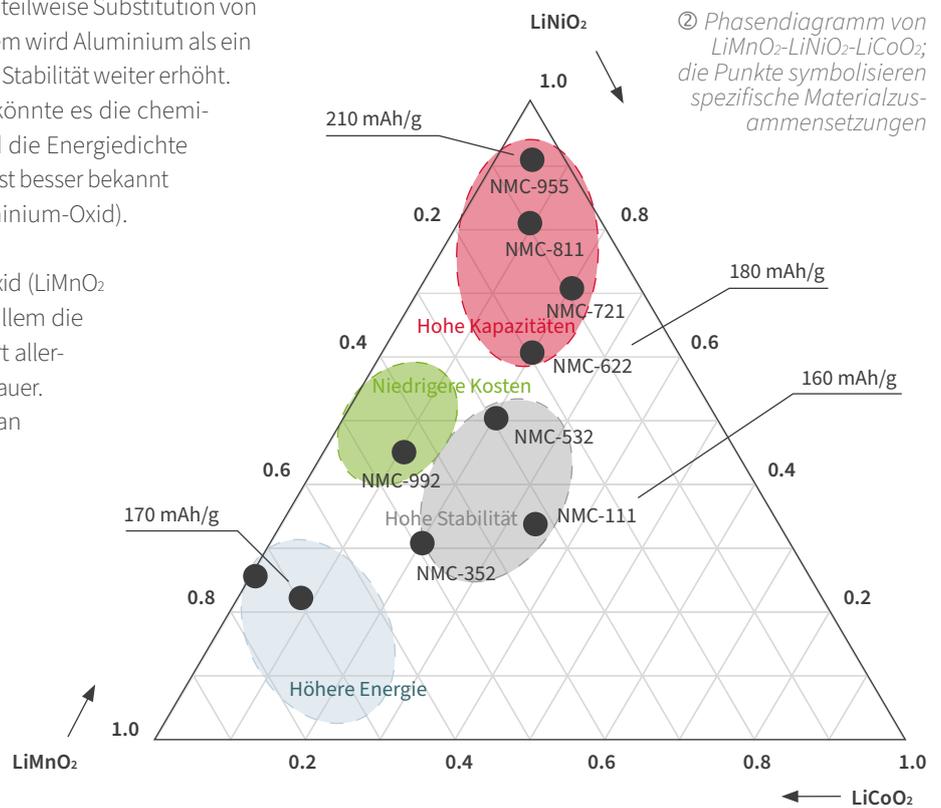
Traditionell kam Lithium-Kobalt-Oxid (LiCoO₂ oder LCO) aufgrund seiner hohen Leistungsfähigkeit zum Einsatz. Doch fragwürdige Abbaubedingungen und Preissteigerungen infolge geringer Verfügbarkeit erforderten Alternativen. Eine solche ist unter anderem Lithium-Nickel-Oxid (LiNiO₂ oder LNO). Dessen Nachteile (siehe Abbildung 1) werden häufig durch die teilweise Substitution von LNO durch Kobalt gemildert. Außerdem wird Aluminium als ein Dotierstoff genutzt, der die chemische Stabilität weiter erhöht. Als Teilersatz für Nickel und Kobalt könnte es die chemische Stabilität, die Lebensdauer und die Energiedichte verbessern. Diese Zellmaterialklasse ist besser bekannt als NCA (Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid).

LNO lässt sich auch durch Mangan-Oxid (LiMnO₂ oder LMO) ersetzen. Das erhöht vor allem die nutzbare Betriebsspannung, verringert allerdings die Stabilität und folglich Lebensdauer. Die kombinierte Dotierung von Mangan und Kobalt, genannt NMC (Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid), ermöglicht es, die Kathodeneigenschaften zu optimieren. Das machte diese Materialklasse zur meistgenutzten. Abbildung 1 fasst einige herausragende Eigenschaften zusammen:

Forschen nach der All-in-One-Materiallösung

Die Aus- und Wechselwirkungen zwischen diesen Materialien veranschaulicht Abbildung 2. Die derzeit entwickelten Kathodenchemien (z. B. NMC-811, NMC-955) bieten hohe Entladekapazitäten, sind aber auch weniger stabil, sowohl hinsichtlich der Zyklen als auch thermisch.

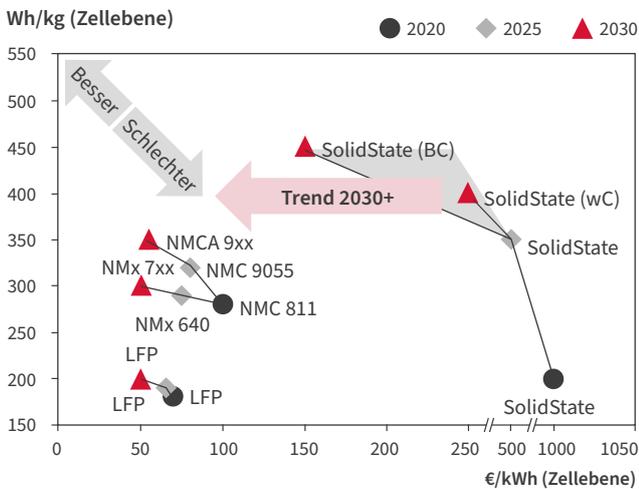
Neue, zukünftige Materialkombinationen dürften die Vielfalt weiter steigern. Dazu zählen ausgefeiltere Iterationen von NMC-Materialien sowie andere chemische Zusammensetzungen. Lithium-Eisen-Phosphat (LiFePO₄, LFP) etwa vereint wichtige Eigenschaften: Es ist chemisch wie thermisch stabil und ermöglicht hohe Entladeraten, das allerdings auf Kosten einer geringen Entladekapazität. Dennoch übertreffen heutige LFP-Batteriezellen hier bereits hochenergetische NMC-Zellen aus dem vergangenen Jahrzehnt. Die LFP-Batterien dienen als kostengünstige und sichere Energiespeicher überall dort, wo Reichweite nicht höchste Priorität hat,



	VORTEIL	NACHTEIL
LNO (LiNiO ₂)	Entladekapazität	Geringere thermische Stabilität, mittelfristig höhere Kosten, geringere Stabilität bei hohen Ladeständen
LCO LiCoO ₂	Entladerate, Stabilität	Kosten, Verfügbarkeit, Umweltauswirkungen
LMO (LiMnO ₂)	Betriebsspannung, Kosten	Zyklusstabilität, geringere Kapazität als Nickel

① Stark vereinfachte, wesentliche Eigenschaften von LCO, LNO und LMO; Randbedingungen wie die Stabilität der Kristallstruktur sind nicht dargestellt

zum Beispiel bei Stadtbussen. Abbildung 3 gibt einen Überblick über die verschiedenen Zellchemien sowie einen Ausblick bis 2030.



③ Überblick über die Energiedichte (gravimetrisch) von Zellchemien in Wh/kg über die Kosten pro kWh

Daraus lässt sich ablesen, dass auf NMC basierende Batteriezellen sehr stark in Richtung hoher Entladekapazitäten getrimmt werden; dies vor allem durch einen gesteigerten Nickelanteil, die Verwendung von SiOX-Anoden und eine verbesserte Produktion. Die Kosten sinken in erster Linie durch die weiter verbreitete Massenproduktion, jedoch auch durch einen geringeren Einsatz von Kobalt. Beim Rohstoff Nickel zeichnet sich bereits jetzt ein Preisanstieg ab. In den kommenden Jahren dürfte sich dieser drastisch verstärken, wenn auch die Massenproduktion von Batterien weiter zunimmt. Daher tendieren die Entwickler bereits dazu, nicht länger nur den Nickelgehalt, sondern vorrangig auch den Mangananteil im Kathodenmaterial zu erhöhen. Solche Materialien dürften in den nächsten Jahren auf den Markt kommen.

Die Zukunft der Festkörperbatterien bleibt ungewiss

Die revolutionären Festkörperbatterien werden Lithiummetall nutzen – zusammen mit einem hochenergetischen Kathodenmaterial und einem festen Elektrolyten/Separator. Noch aber stehen sie vor großen Herausforderungen: die Hürden reichen derzeit von der Großserienproduktion mit erprobten Zellchemien über die Leistung bei Kälte bis hin zu vertiefenden Untersuchungen auf Systemebene, was das Schwellverhalten der meistens eingesetzten Pouch-Zellen betrifft. Vor 2030 ist daher nicht mit einer Serienfertigung von Festkörperbatteriezellen zu wettbewerbsfähigen Preisen zu rechnen, ungeachtet einzelner anderslautenden Meldungen über bahnbrechende Fortschritte.

Auch die Weiterentwicklung von NMC-Materialien hin zu hohen Energiedichten ist anspruchsvoll, denn nickelhaltige Schichtoxide verringern generell die strukturelle und thermische Stabilität, insbesondere wenn die Batterie stark geladen ist. Auf Systemebene bedeutet dies, dass sich die zyklische Lebensdauer

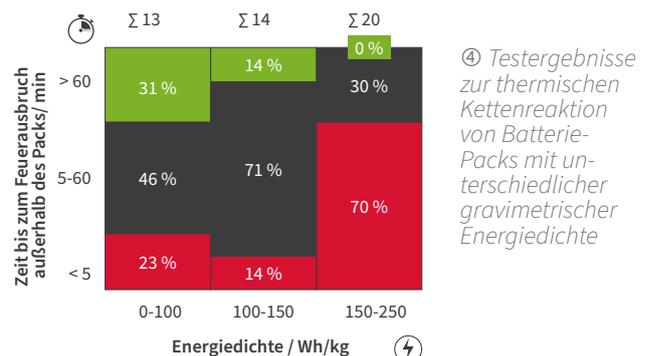
verkürzt und eine potenzielle thermische Kettenreaktion (ein „Durchgehen“) früher als bisher einsetzen kann. Ein Beispiel: Das herkömmliche Material bleibt auch bei Temperaturen von mehr als 300 °C stabil, das neue (NMC-622) zersetzt sich bereits oberhalb von 270 °C. Da diese Materialien die Energiedichte von Batterien (und damit die Reichweite von BEVs) erhöhen, sind solche Einschränkungen jedoch toleriert. Geltende Sicherheitsstandards auf Zell- und Systemebene zu wahren oder zu verbessern, wird damit laufend anspruchsvoller.

FEV blickt bei der Sicherheit von Hochleistungsbatterien durch

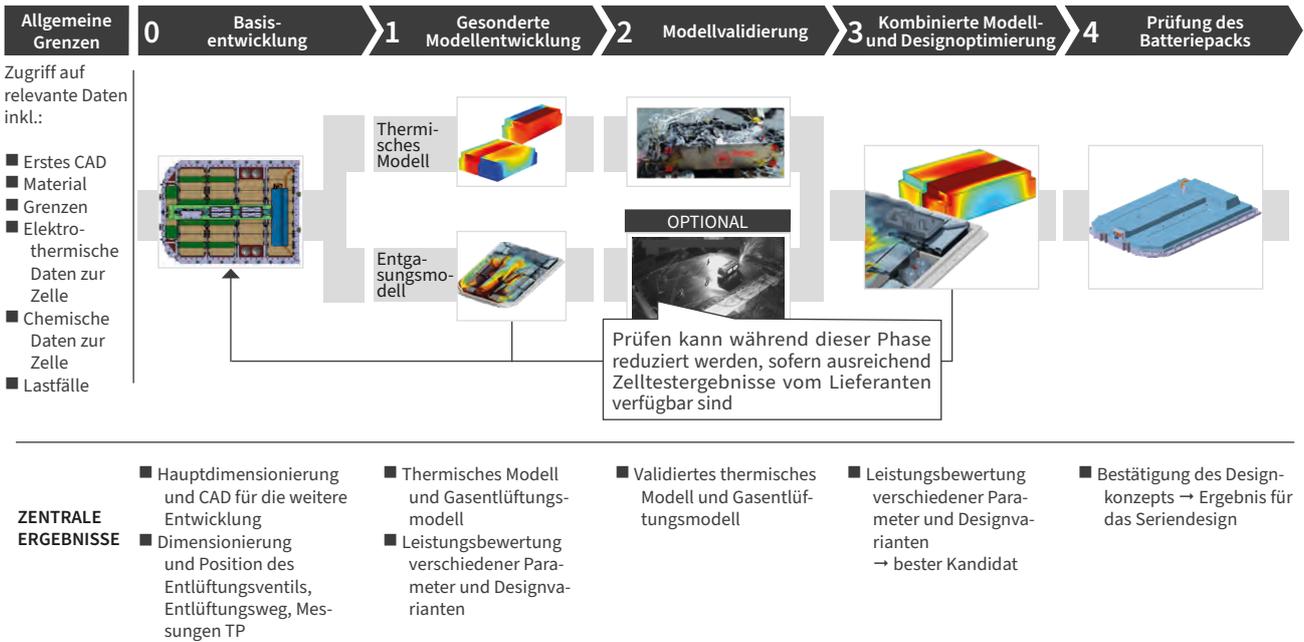
Was die Sicherheit betrifft, haben Europa (mit ECE R100, Revision 2) und China (mit GB 38031) die derzeit strengsten Zulassungsvorschriften. Letztgenannte Norm enthält zwei neue Regeln in Bezug auf potenzielle thermische Kettenreaktionen in Hochvolt (HV)-Batterien: Erstens muss es ein Warnsignal geben, das die Fahrzeuginsassen alarmiert. Zweitens ist ein Zeitraum von fünf Minuten sicherzustellen, in dem keinem Fahrgast etwas geschehen darf. Dies wird gemeinhin interpretiert als „kein Feuer außerhalb des Batteriegehäuses“. Solche Vorgaben werden in den nächsten Jahren in die ECE R100 übernommen. Außerdem dürfte die vorgeschriebene Vorwarnzeit später schrittweise auf 20 oder sogar 40 Minuten steigen. Das ultimative Ziel lautet natürlich, sämtliche Brände außerhalb einer Batterie zu verhindern.

Um ein Hochvolt-Batteriesystem gemäß diesen gesetzlichen Anforderungen zu zertifizieren, gilt es, den Entwicklungsstand bereits in frühen Phasen zu validieren. Das moderne Batterie-Prüfzentrum eDLP von FEV ist dafür gemacht: Es verfügt über mehrere Prüfstände, ausgelegt auf die Missbrauchsprüfung von Zellen, Modulen und Packs. Abbildung 4 fasst die Ergebnisse der Tests zum thermischen Durchgehen auf Pack-Ebene zusammen.

In jeder Energiedichteklasse gibt es demzufolge Batterien, die das 5-Minuten-Kriterium nicht erfüllen. In der Kategorie „über 150 Wh/kg“ finden sich diese mit Abstand am häufigsten. Bei sehr vielen Batterien aber bleibt ein thermisches Durchgehen für fünf bis 60 Minuten intern, die meisten davon gehören zur „Mittelklasse“. Sogar länger als eine Stunde gelingt das rund einem Drittel der Basis-Batterien (grüne Felder in Abbildung 4), jedoch keiner einzigen der Top-Kategorie. Je höher also der Energiegehalt, desto schwieriger wird es, die Folgen einer thermischen Kettenreaktion vollständig einzudämmen.



④ Testergebnisse zur thermischen Kettenreaktion von Batterie-Packs mit unterschiedlicher gravimetrischer Energiedichte



© Der FEV-Entwicklungsansatz für eine bestmögliche thermische Sicherheit von Kfz-Batteriesystemen

Monate in der Batterieentwicklung sparen

Der praxiserprobte FEV Ansatz, die enorm wichtige Sicherheitsentwicklung zu bewältigen, besteht aus vier Schritten (siehe Abbildung 5).

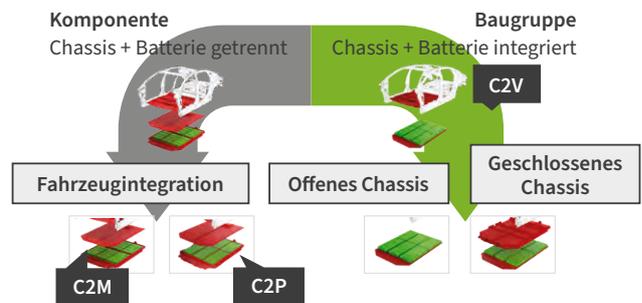
Ausgehend von einem ersten Batterie-Grunddesign werden in der Regel zwei separate Modelle entwickelt (Schritt 1): ein detailliertes thermisches 3D-Modell und ein spezielles Gasentlüftungsmodell. Schritt 2 validiert das Modell für weiterhin genaue und belastbare Simulationsergebnisse. Anschließend werden die Modelle kombiniert, um thermische Kettenreaktionen auf Pack-Ebene nachzustellen. Bei Bedarf lassen sich weitere Details wie der Partikelstrom und/oder die Flammenausbreitung hinzufügen. Die daraus gewonnenen Ergebnisse dienen dazu, das Design zu optimieren (Schritt 3). Für bestmögliche Resultate, beispielsweise die Position und Stärke von Wärmebarrieren betreffend, sind mehrere Iterationen möglich. Der eigentliche Pack-Test folgt als Schritt 4 – und kommt idealerweise mit sehr wenigen Batterien aus. Insgesamt reduziert der simulative Ansatz von FEV die Entwicklungszeit um mehrere Wochen oder Monate. Damit sinken auch die Kosten deutlich.

Über die Fahrzeugentwicklung zu besseren Batterie-Eigenschaften

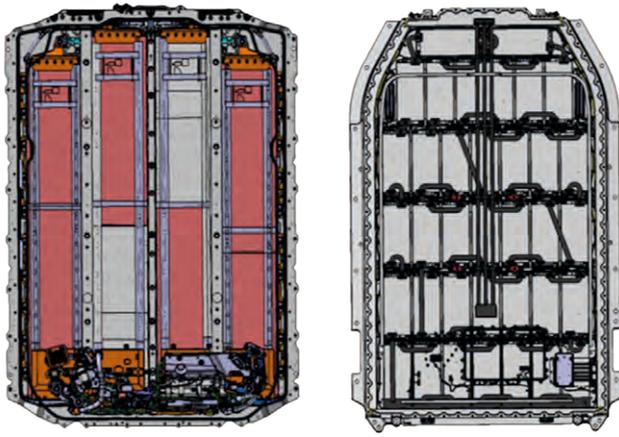
Andere Ansätze für bessere BEV-Eigenschaften sind die jeweils optimierte Integration der Batteriezelle in das Fahrzeug (cell-to-vehicle, C2V) und in das Pack (cell-to-pack, C2P). Letzteres wird dann als optimierte Komponente betrachtet, die bis zum Einbau unabhängig vom Fahrzeug betrachtet wird. Module und Gehäuse entfallen dabei so weit wie möglich. Das kann Gewicht und Platz sparen. Der klassische Design-Ansatz mit Modulen nennt sich Cell-to-Module (C2M) und beruht weitgehend auf demselben Konzept: C2P ist eine Optimierung von C2M. Ab-

bildung 6 zeigt die grundsätzliche Klassifizierung. C2V ist ein neuartiges Konzept, das die Integration des Batterie-Packs in das Stammfahrzeug neu bewertet: Der Stromspeicher ist nicht mehr zwingend eine separate Komponente; dieser wird vielmehr zu einer Baugruppe des Fahrwerks. Die Entscheidung, ein BEV nach dem Cell-to-Vehicle-Ansatz zu bauen, muss entlang des Entwicklungsprozesses und der gesamten Wertschöpfungskette viel früher als bisher erfolgen. Von Letzterer sind daher auch größere Teile betroffen.

Die Batterie verstärkt potenziell sogar die Fahrzeugstruktur: Crashelemente, Knautschzonen und Schwingungsdämpfer etwa können entweder größtenteils chassisintegriert sein (z. B. Tesla Model S) oder aber in die Batterie verlagert und/oder dieser hinzugefügt werden (z. B. Mercedes EQC).



© Klassifizierung von Zelle-zu-Modul (C2M)-, Zelle-zu-Pack (C2P)- und Zelle-zu-Fahrzeug (C2V)- Konzepten



⑦ CAD-Modelle des Batterie-Packs eines Tesla Model 3 (links) und eines Jaguar I-Pace (rechts); dargestellt ist die Draufsicht mit abgenommener Abdeckung (Fahrtrichtung: von unten nach oben)

FEV untersuchte die C2P- und C2V-Konzepte genauer; und zwar theoretisch, angewandt auf CAD-Modelle eines Tesla Model 3 und eines Jaguar I-Pace (Abbildung 7).

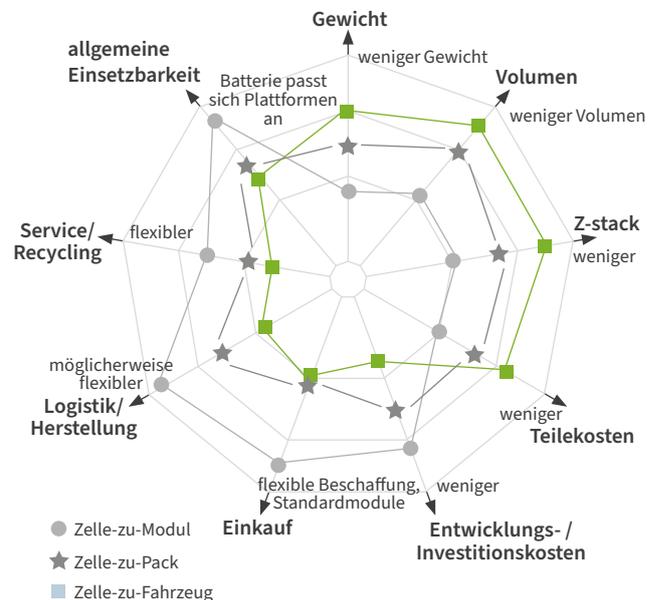
Die wichtigsten Ergebnisse zeigt Abbildung 8. Interessant dabei: Die volumetrische Energiedichte kann stärker steigen als die gravimetrische. Außerdem lässt sich die geringere Z-Höhe für das Gesamtdesign nutzen, sie eröffnet neue Bauraumoptionen.

	C2P	C2V
Flexibilität/Übertragbarkeit Teile, die ausgetauscht/gewartet werden können. Weniger davon bedeutet geringere Flexibilität und höheren Aufwand, um eine plattformübergreifende Übertragbarkeit zu erreichen	90 %	75 %
Gesamtkosten Summe aus Entwicklungs- und Teilkosten	95 %	70 %
Energiedichte - Volumen Neuberechnete Werte aufgrund des verringerten Volumens	135 %	150 %
Energiedichte - Gewicht Neuberechnete Werte aufgrund des reduzierten Gewichts	113 %	120 %
Z-Stack Platzgewinne in Z-Richtung, eines der wichtigsten Entwicklungsziele	-15 mm	-22 mm

⑧ Wichtigste Ergebnisse der FEV-Simulation eines C2P- und C2V-Ansatzes im Batterie-Pack des Tesla Model 3 und des Jaguar I-Pace, angegeben als qualitativer Mittelwert

An Modulen festzuhalten, bleibt der flexiblere, service- und recyclingfreundlichere Ansatz. Außerdem kann die Übertragbarkeit zwischen Plattformen hoch bleiben, wie zum Beispiel beim MEB von Volkswagen. Logistik und Produktionsprozesse sind hier bereits etabliert. Auch die Beschaffung erfolgt potenziell mit hoher Flexibilität, Standardmodulgrößen lassen sich von mehreren Lieferanten beziehen. Sogar unterschiedliche Zellen in demselben Batterie-Pack sind möglich.

Doch so vielfältig die Optionen, so negativ wirken sie sich auf das Gewicht, das Volumen und die Höhe der Batterie aus. Eine anspruchsvolle C2P-Batterie oder der C2V-Ansatz kann Abhilfe schaffen (siehe Abbildung 9). Mit der Entscheidung für eine dann hohe vertikale Integration von Karosserie und Stromspeicher wird die Wahl der Batteriezelle wichtiger. Letztere beeinflusst mitsamt ihren Eigenschaften die Gesamtentwicklung dann noch stärker.



© FEV-Bewertung von drei Batterie-Integrationskonzepten als Netzdiagramm

Das eine, alles verbessernde Batteriedesign- und Integrationskonzept steht noch aus. Dennoch bieten sich mittlerweile viele neue Gelegenheiten, automobile Batterien für jeden Bedarf und Anwendungsfall zu optimieren. Die Anforderungen eines kleinen Start-ups zum Beispiel unterschieden sich von jenen eines großen OEM. Es gibt dennoch Konstanten für beide: Das Batteriesystem bleibt für neue BEVs mindestens genauso wichtig wie früher – und FEV weiß genau, wie man dem am besten Rechnung trägt.

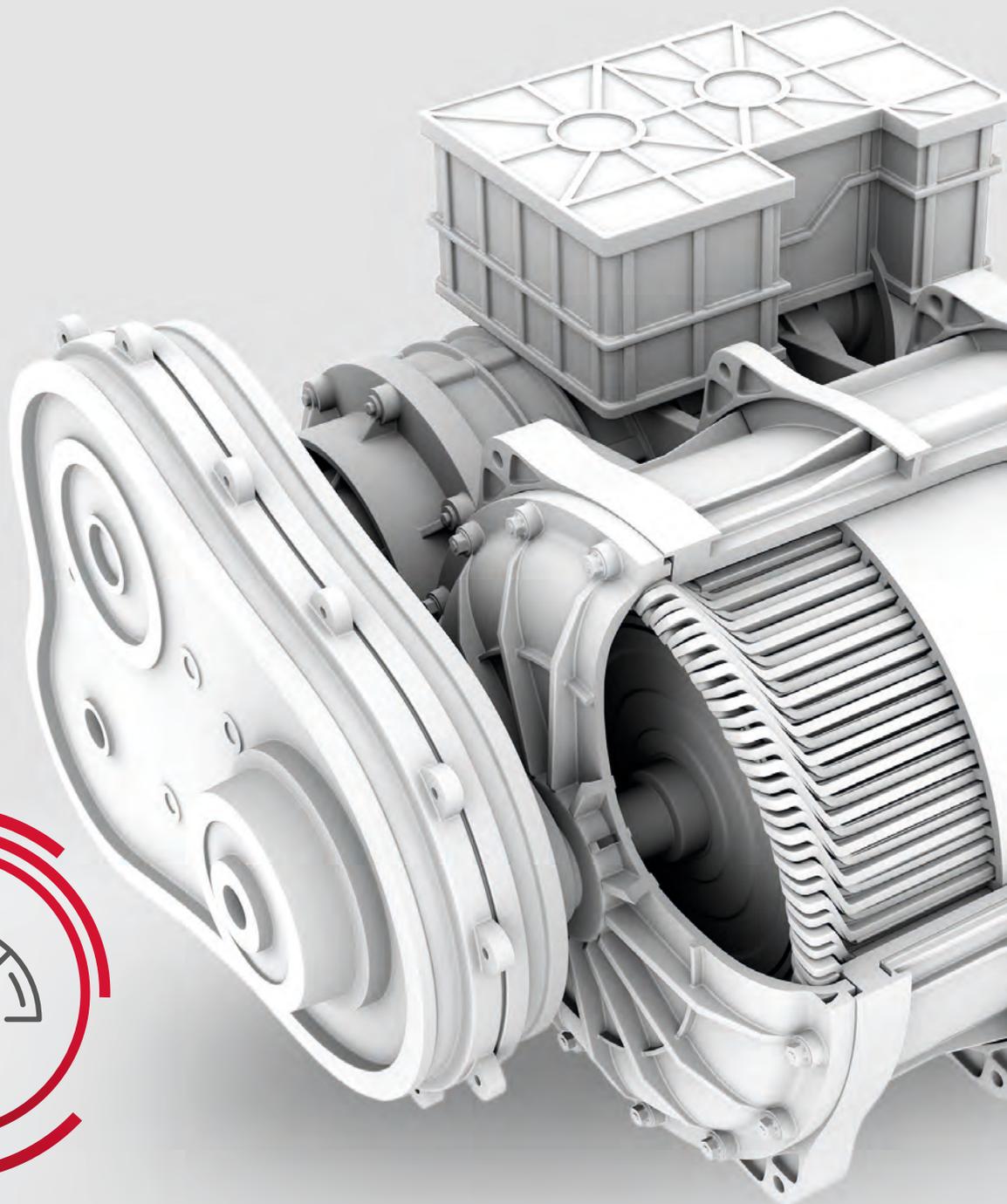
Von

- Moritz Teuber · teuber_m@fev.com
- Michael Stapelbroek · stapelbroek@fev.com
- Rüdiger Beykirch · beykirch@fev.com
- Christian Kürten · kuerten@fev.com

STROMSPARSTRATEGIE FÜR DEN E-MOTOR

FEV STÄRKT DIE ELEKTROAUTOEFFIZIENZ DURCH THERMISCHE FELTSCHWÄCHUNG

Weniger Energieverbrauch und mehr Reichweite? Auch in der Elektromobilität bildet höhere Antriebsstrangeffizienz den Schlüssel dazu. FEV hat daher einen neuen Wärmemanagementansatz für die gängigste Elektromotorentopologie entwickelt. Damit lässt sich der Energieverbrauch relativ einfach um bis zu einem Prozent senken. Weit höher ist das Potenzial dieser Strategie für kommende E-Motorgenerationen.





So wirkungsgradstark der Motor eines Elektrofahrzeugs (Electric Vehicle, EV) auch ist: Zu den verbliebenen Verlusten im Antriebsstrang trägt er erheblich bei. FEV hat daher einen neuen Ansatz erarbeitet, den Status quo von permanentmagneterregten Synchronmaschinen (PMSMs) zu verbessern. Schließlich sind sie derzeit die gängigste Wahl für Elektroautos. Die Strategie nennt sich „aktive thermische Feldschwächung“.

Mit der Magnettemperatur kann die Reichweite steigen

Aufgrund hoher Leistungsanforderungen, wie beispielsweise schnelle Beschleunigung, und die Auslegung auf Spitzenleistungen, werden bei PMSMs Seltenerdpermanentmagnete mit hohen magnetischen Energiedichten eingesetzt. Diese haben eine hohe inhärente magnetische Erregung. Diese Erregung kann nicht an verschiedene Betriebspunkte angepasst werden, wie es beispielsweise bei fremderregten Synchronmaschinen oder bei Asynchronmaschinen der Fall ist. Aus diesem Grund muss bei permanentmagneterregten Synchronmaschinen, um höhere Drehzahlen zu erreichen, im Bereich der Feldschwächung ein zusätzlicher Strom eingespeist werden, welcher ein den Permanentmagneten entgegengesetztes magnetisches Feld erzeugt, um diese zu schwächen. Durch diesen zusätzlichen Strom steigen die Kupferverluste, was sich negativ auf den Wirkungsgrad und damit auf die Effizienz der elektrischen Maschine auswirkt. Hinzu kommt, dass nur ein kleiner Teil des gesamten Betriebsbereichs der Maschine tatsächlich regelmäßig angefahren wird und Betriebspunkte mit höchsten Leistungsanforderungen nur in wenigen Ausnahmesituationen benötigt werden.

Um die magnetische Erregung variieren zu können, macht sich FEV daher eine charakteristische Eigenschaft der Permanentmagnete zunutze: Aufgrund der negativen Temperaturkoeffizienten von Remanenzflussdichte und Koerzitivfeldstärke sinkt die magnetische Energiedichte von Seltenerdpermanentmagneten mit zunehmender Temperatur. Dieses Verhalten kann im Bereich der Feldschwächung, bei Betriebspunkten mit geringerer Leistungsanforderung, dazu genutzt werden, um mit reduzierter Kühlleistung die Rotortemperatur und damit auch die Magnettemperatur zu erhöhen und die Permanentmagnete so bereits thermisch zu schwächen. Damit wird nur noch ein geringerer zusätzlicher Strom zur Feldschwächung benötigt, was die Kupferverluste in diesen Betriebspunkten reduziert. Folglich kann sich ein aktives Wärmemanagement – verwirklicht über eine alternative Kühlungsstrategie – sehr gut dazu eignen, die magnetische Erregung zu regulieren. Anders ausgedrückt: Gelingt es, die Temperatur in Betriebspunkten mit niedriger Last kontrolliert zu steigern, gewinnt der E-Motor insgesamt an Effizienz.

FEV Studien ergaben, dass sich damit der Energieverbrauch um 0,32 Prozent in einem realen Fahrzyklus (konzipiert von FEV) und um 0,59 Prozent im WLTP (Worldwide harmonized Light Vehicles Test Procedure) senken lässt. Bei 120 km/h Reisegeschwindigkeit sinkt der Energieverbrauch um etwa einen Prozentpunkt gegenüber einem E-Motor mit herkömmlicher Kühlstrategie.

Welches Fahrzeug wurde simuliert?

Der Simulation und den Analysen legte FEV ein Elektrofahrzeug der Kompaktklasse zugrunde, angetrieben an einer Achse von einer PMSM mit 150 kW und 310 Nm. Dieser Aufbau ist repräsentativ für aktuelle Serien-EVs. Die genauen Fahrzeug- und

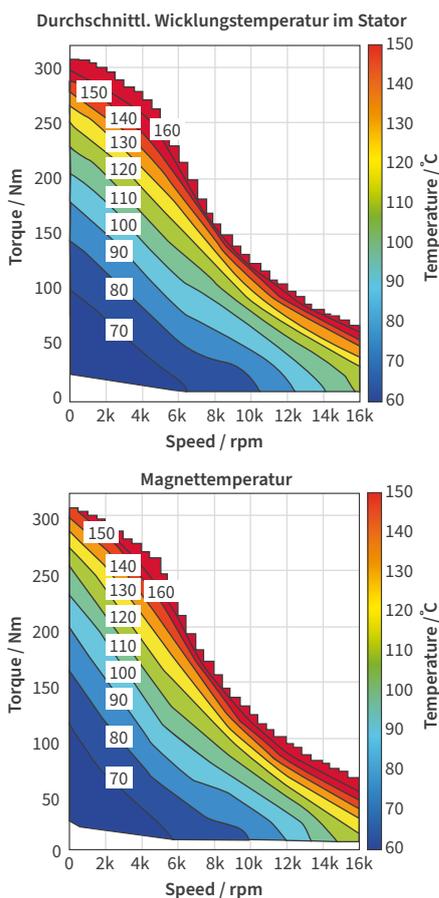
Parameter	Wert	Einheit
Leergewicht	1.850	kg
Gesamtgewicht	1.925	kg
Stirnfläche	2,36	m ²
Luftwiderstandsbeiwert	0,267	-
Höchstgeschwindigkeit	160	km/h

①② Fahrzeugparameter (oben) und Parameter der elektrischen Maschine (unten)

Parameter	Wert	Einheit
Maximale Leistung	> 150	kW
Maximales Drehmoment	310	Nm
Maximaler Effektivstrom	450	A
Drehmomentkonstante	0,63	Nm/A
Bemessungsspannung	355	V
Rotordurchmesser	161	mm
Aktive Länge	230	mm
Maximale Drehzahl	16.000	min ⁻¹
Anzahl der Nuten	48	-
Anzahl der Polpaare	4	-
Elektroblech für Rotor und Stator	M235-35A	-
Permanentmagnetmaterial	N42UH	-

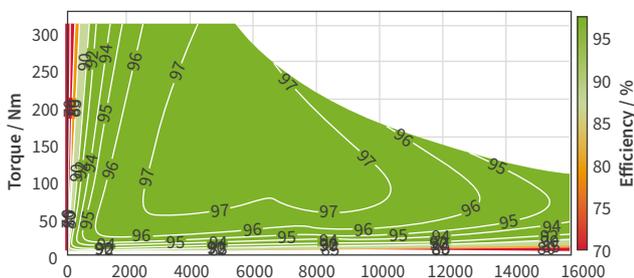
Maschinenparameter sind in den Abbildungen 1 und 2 dargestellt. Entsprechend dem moderaten Leistungsniveau wurden 400 V als Systemspannung definiert. Beim Wechselrichter nahm FEV ein System mit Leistungshalbleitern auf Basis von Siliziumkarbid (SiC) an.

Abbildung 3 visualisiert die durchschnittliche Wicklungstemperatur im Stator (oben) und die Magnettemperatur (unten), in Abhängigkeit der Betriebspunkte im Drehmoment-Drehzahl-Kennfeld. Die Temperaturen ergeben sich im thermisch eingeschwungenen Zustand, bei einer nominalen Kühlmittleinlasstemperatur von 60 °C und einer Kühlmitteldurchflussmenge von 10 l/min. Grundsätzlich ist die elektrische Maschine über weite Teile des Betriebsbereichs eher kühl. Die Magnettemperatur bleibt bis zu einer Dauerleistung von 50 kW bei rund 10.000 min⁻¹ unter 100 °C. Die betriebspunktabhängige Effizienz ist im Wirkungsgradkennfeld in Abbildung 4 dargestellt, für eine Rotor und Statortem-



③ Durchschnittliche Wicklungstemperatur im Stator (oben) und Magnettemperatur (unten) in Abhängigkeit der Betriebspunkte im Drehmoment-Drehzahl-Kennfeld bei einer nominalen Kühlmittelasstemperatur von 60 °C und einer Kühlmitteldurchflussmenge von 10 l/min

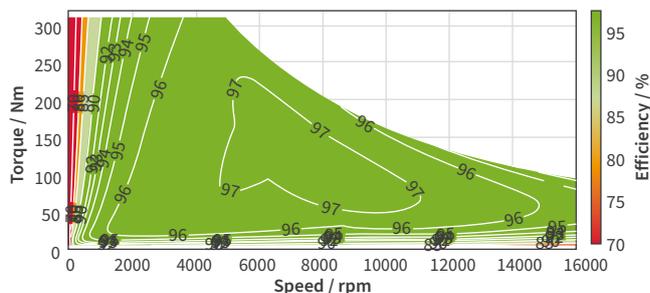
peratur von 60 °C. Es gibt einen großen Bereich, in dem ein Wirkungsgrad von 97 Prozent erreicht wird. Der Bereich mit einem Wirkungsgrad über 95 Prozent endet in etwa bei einer Drehzahl von 15.000 min⁻¹ und 75 Nm Drehmoment. Bei sehr hohen Drehzahlen und gleichzeitig geringen Drehmomenten lässt sich ein kleiner Bereich ausmachen, in dem der Wirkungsgrad unter 85 Prozent sinkt. Dieser ist im Kennfeld gelb und rot dargestellt.



④ Wirkungsgradkennfeld für eine Rotor und Statortemperatur von 60 °C

Temperaturabhängigkeit des Wirkungsgrads

Das in Abbildung 5 dargestellte Wirkungsgradkennfeld der untersuchten PMSM zeigt, wie der betriebspunktabhängige Wirkungsgrad sich bei steigender Temperatur verändert.



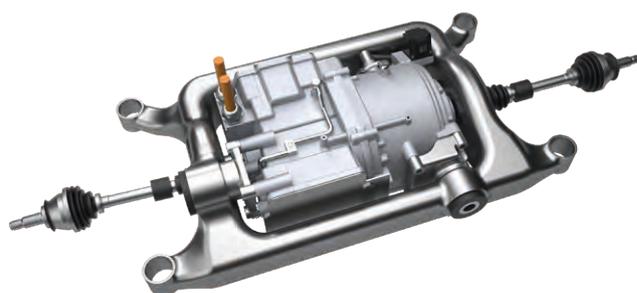
⑤ Wirkungsgradkennfeld für eine Rotor- und Statortemperatur von 140 °C

Das Wirkungsgradkennfeld bei 60 °C in Abbildung 4 zeigte einen Bereich von 97 Prozent, der bis zum Eckpunkt bei ca. 5.500 min⁻¹ und 310 Nm reicht. Bei darüberliegenden Temperaturen, wie sie in der Abbildung 5 dargestellt sind, sinkt der Wirkungsgrad jedoch für diesen Eckpunkt zunehmend. Für diese Betriebspunkte mit einer hohen Leistung ist also eine gute Kühlung zielführend, um hohe Wirkungsgrade zu erreichen.

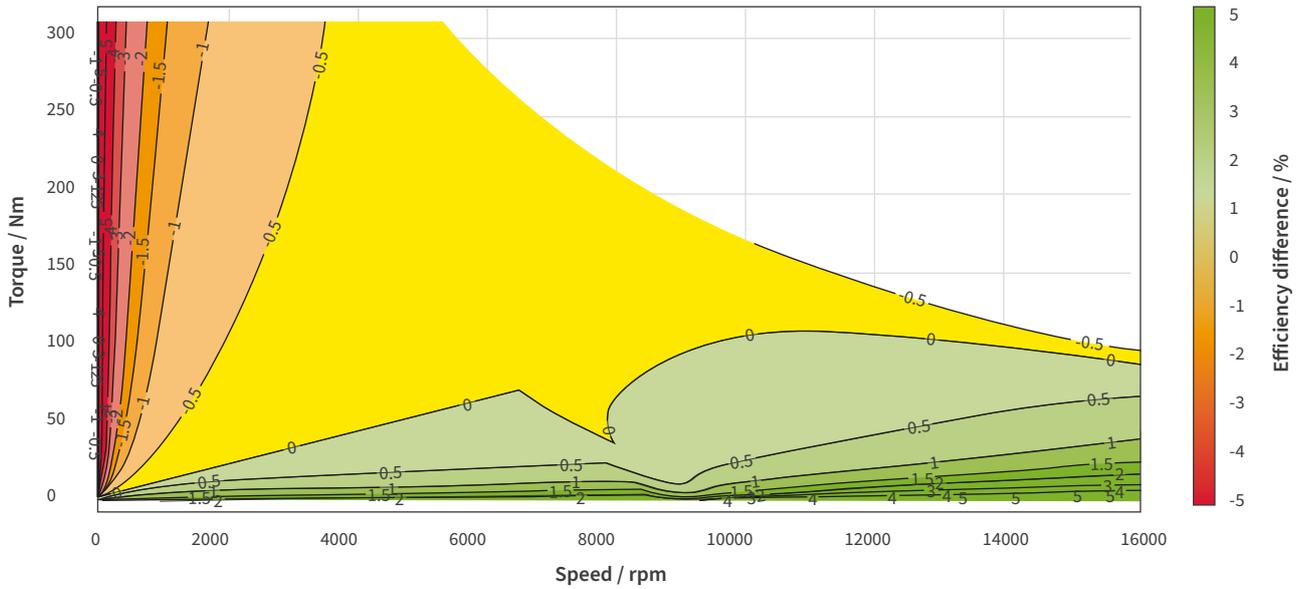
Genau anders verhält es sich für Bereiche mit niedrigerer Leistung. Für Drehmomente unter 100 Nm erstreckt sich der Bereich in Abbildung 4 mit einem Wirkungsgrad von 97 Prozent bei 60 °C von etwa 2.500 min⁻¹ bis knapp über 10.000 min⁻¹. Bei einer Temperatur von 140 °C, dargestellt in Abbildung 5, zeigt sich jedoch, dass sich dieser Bereich mit einem Wirkungsgrad von 97 Prozent bis auf über 11.000 min⁻¹ erweitert. Generell übertrifft der Wirkungsgrad bei 140 °C bei hohen Drehzahlen und bei niedrigen Drehmomenten jenen bei 60 °C. Der Bereich von nur maximal 85 Prozent Wirkungsgrad (wieder gelb und rot dargestellt) ist ebenfalls deutlich kleiner als bei einer Rotor- und Statortemperatur von 60 °C.

Neue thermische Möglichkeiten erkennen

In welchen Betriebsbereichen die höhere Temperatur vorteilhaft ist, untersuchte FEV näher. Gerade wenn es darum geht, den Gesamtwirkungsgrad über komplette Fahrzyklen hinweg zu verbessern und damit die Reichweite des E-Fahrzeugs zu steigern, spielen die Temperaturen in der elektrischen Maschine als Teil des Gesamtantriebsstrangs eine entscheidende Rolle. Ein solcher Antriebsstrang für ein Elektrofahrzeug ist beispielhaft in Abbildung 6 dargestellt.



⑥ Exemplarischer Gesamtantriebsstrang eines Elektrofahrzeugs



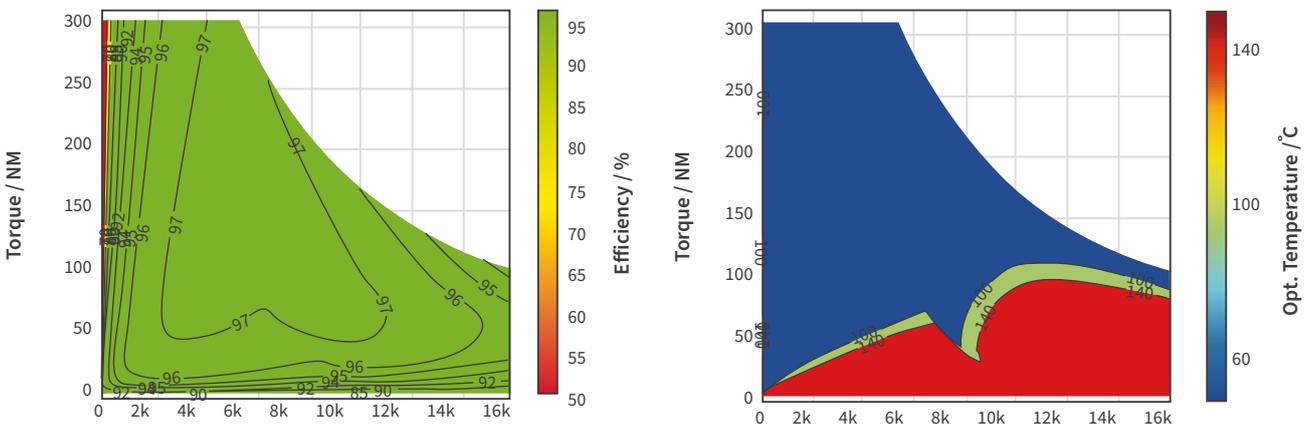
⑦ Zu- oder Abnahme des Wirkungsgrads, wenn die Motortemperatur von 60 °C auf 140 °C steigt

FEV analysierte daher zunächst detaillierter, was der Betrieb mit höherer Temperatur für verschiedene Betriebspunkte bewirken kann. Abbildung 7 veranschaulicht, wie sich die Effizienz ändert, wenn die gesamte elektrische Maschine von 60 °C auf 140 °C erwärmt wird. Die positiven Werte beschreiben dabei einen höheren Wirkungsgrad bei einer hohen Temperatur und die negativen Werte einen verringerten Wirkungsgrad bei hoher Temperatur. Bei 10.000 min⁻¹ ist für bis zu 100 kW Leistung eine hohe Motortemperatur günstiger. Niedrigere Temperaturen aber ergeben bei geringen Drehzahlen und hohen Drehmomenten den besseren Wirkungsgrad, da der temperaturabhängige elektrische Widerstand und damit die Kupferverluste sinken.

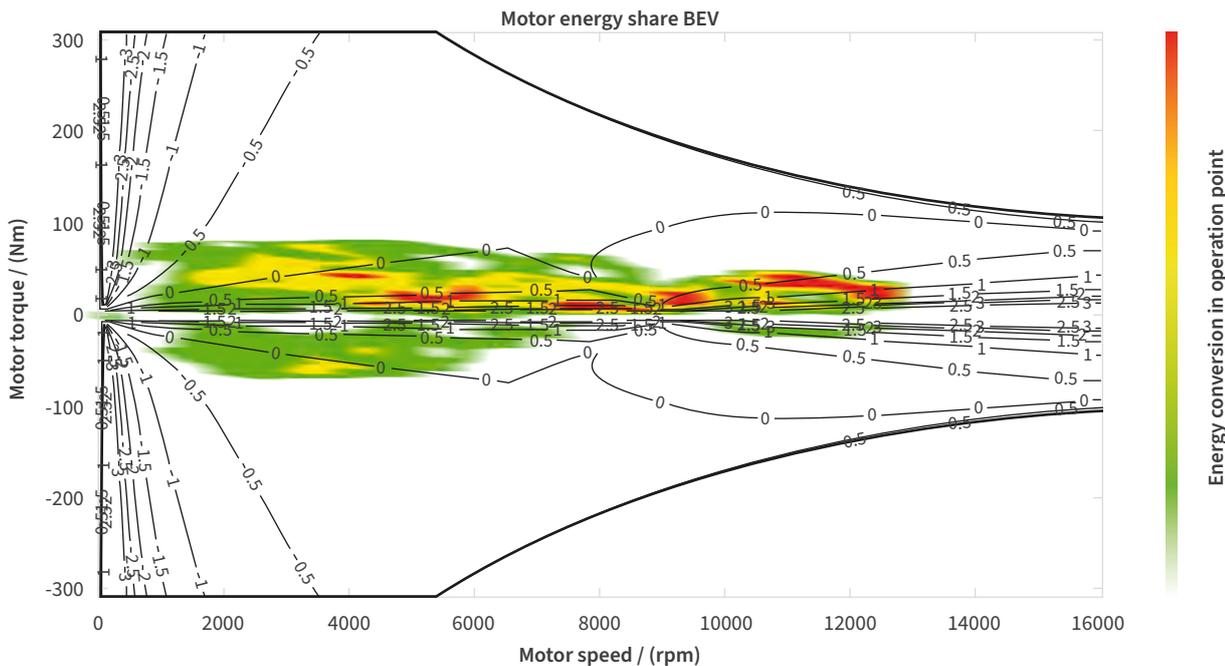
Zu den Nachteilen einer gesteigerten Gesamtmotortemperatur zählt, dass sich die maximale Leistungsfähigkeit verringert. Bei einer Vollastbeschleunigung – dem selten abgerufenen Bereich von Spitzendrehmoment und -leistung – bietet eine kühlere elektrische Maschine mehr Drehmoment und damit eine bessere Leistung. Abbildung 9 zeigt jedoch, dass die meiste Energieumwandlung in Betriebspunkten geschieht, in denen eine höhere Temperatur besser ist. Farbig dargestellt ist die Betriebspunktverteilung, die sich für das untersuchte Fahrzeug für einen WLTC-Klasse-3-Testzyklus ergibt.

Wird für jeden Betriebspunkt die Motortemperatur gewählt, aus welcher der höchste Wirkungsgrad resultiert, so ergibt sich das in Abbildung 8 (links) dargestellte kombinierte Wirkungsgradkennfeld. Abbildung 8 (rechts) zeigt die dafür erforderlichen Temperaturen für jeden Betriebspunkt, die es für den bestmöglichen Wirkungsgrad zu erreichen gilt.

Dies deutet darauf hin, dass eine Verringerung der magnetischen Energiedichte durch gezielte Temperaturerhöhung – die aktive thermische Feldschwächung – dem Elektroauto in den meisten realen Betriebspunkten zu mehr Effizienz verhilft. Vereinfacht ausgedrückt: „Heißer“ ist besser für den täglichen Fahrbetrieb. Um diese Erkenntnisse weiter zu verifizieren, übertrug FEV die oben beschriebene Strategie auf den EV-Antriebsstrang.



⑧ Abbildung 8: Kombiniertes Wirkungsgradkennfeld des E-Motors (links) und die dafür erforderlichen Temperaturen (rechts)



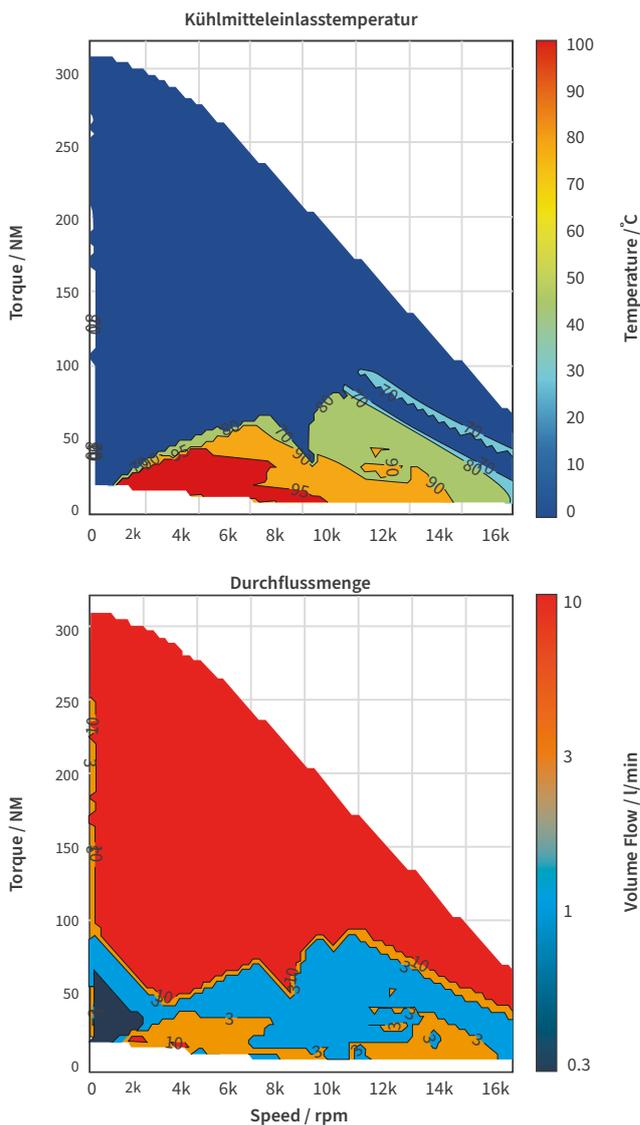
© *Energieumwandlung in Betriebspunkten, die sich für das untersuchte Fahrzeug für einen WLTC-Klasse-3-Testzyklus ergeben*

Das Kühlmittel mit in die Rechnung aufnehmen

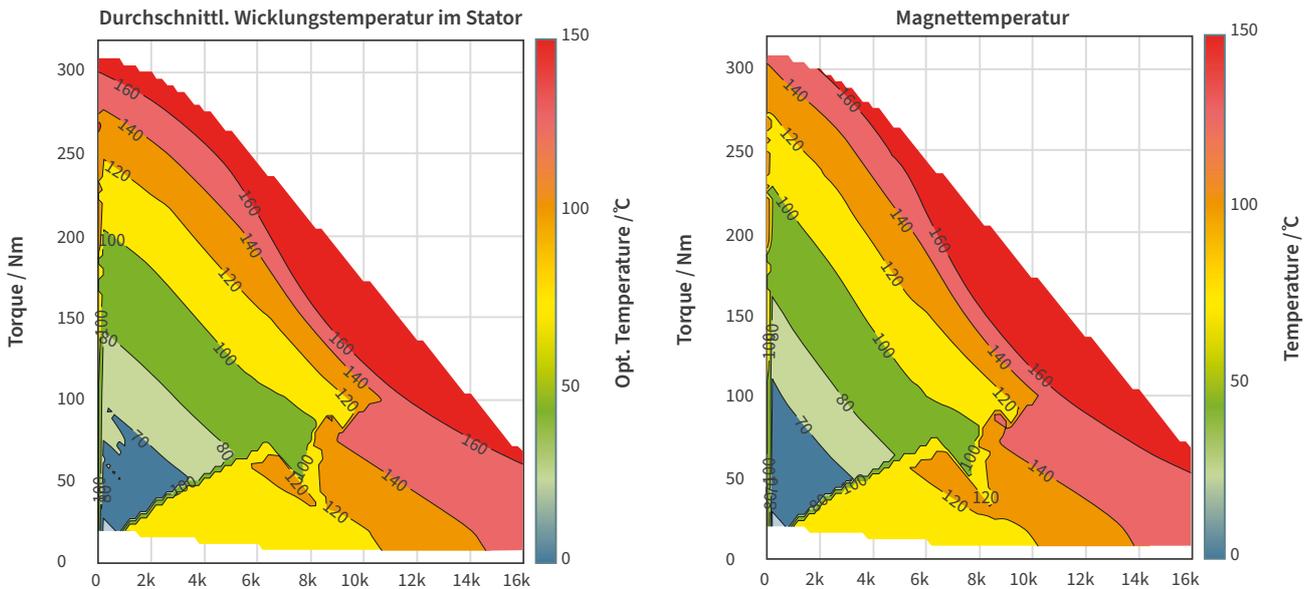
Um die Temperatur der PMSM auf ein höheres Niveau zu bringen, ist es wichtig zu verstehen, wie das Temperaturmanagement für gewöhnlich funktioniert. Im stationären thermischen Zustand gibt es zwei Einflussfaktoren: die Verluste sowie der Wärmetransfer an das Kühlmittel. Beim beispielhaft untersuchten E-Motor mit Wassermantelkühlung und luftgekühltem Rotor können die Rotor- und Statortemperatur nicht separat beeinflusst werden. Basierend auf den günstigen Temperaturbereichen aus Abbildung 8 (rechts) berechnete FEV die in Abbildung 10 dargestellte notwendige Kühlmittelinlasstemperatur und durchflussmenge.

Für den Zielbereich von 60 °C beträgt die notwendige Kühlmittelinlasstemperatur immer 60 °C. Ein Volumenstrom von 10 l/min hilft den Wärmeübergang zu maximieren und möglichst geringe Temperaturen zu erreichen. Nur für einige sehr niedrige Lastpunkte kann der Volumenstrom des Kühlmittels reduziert werden, da die Komponenten-Temperaturen in diesem Bereich unter 65 °C liegen.

Eine andere Strategie gilt für den Betriebsbereich, in dem die Solltemperatur 140 °C beträgt. In Betriebspunkten mit niedriger Last muss hier ein Kompromiss für den Volumenstrom gefunden werden. Das liegt daran, dass ein geringer Volumenstrom den Wärmeübergangskoeffizienten reduziert und sich das Kühlmittel stärker erwärmt. Folglich wird eine niedrigere Einlasstemperatur benötigt, um die Austrittsgrenze von 100 °C nicht zu überschreiten. Eine hohe Durchflussrate wiederum steigert auch den



© *Notwendige Kühlmittelinlasstemperatur (oben) und Durchflussmenge (unten) für Motortemperaturen bei denen der beste Wirkungsgrad erzielt werden kann*



Ⓜ Durchschnittliche Wicklungstemperatur im Stator (links) und Magnettemperatur (rechts) in Abhängigkeit der Betriebspunkte im Drehmoment-Drehzahl-Kennfeld bei aktiver thermischer Feldschwächung

Wärmeübergangskoeffizienten. Aufgrund der geringen Erwärmung des Kühlmittels lässt sich die Einlasstemperatur gegenüber der niedrigeren Durchflussrate erhöhen.

Für die meisten Betriebspunkte bildet ein Volumenstrom von 2 l/min bis 3 l/min einen guten Kompromiss zwischen Wärmeübertragung und Temperatursteigerung. Bei sehr niedrigen Lasten sind einlassseitig mehr als 90 °C optimal. Da die Verluste mit steigendem Drehmoment wachsen, wird die Einlasstemperatur gesenkt, um die Temperaturgrenzen der elektrischen Maschine einzuhalten.

Zwischen 10.000 min⁻¹ mit 100 Nm und 16.000 min⁻¹ mit 50 Nm liegt ein Leistungsbereich mit höherer Einlasstemperatur. Diese wird beim Wechsel von 3 l/min auf 10 l/min erhöht. So lassen sich die Zieltemperaturen bei höherem Wärmeübergangskoeffizienten und geringerer Kühlmittelerwärmung einhalten. Eine kontinuierliche Durchflussregelung würde diesen Effekt beheben.

Die daraus resultierenden Temperaturen im stationären Zustand für Wicklung und Magnete zeigt Abbildung 11. Die Grenze zwischen den Zieltemperaturen 60 °C und 140 °C ist deutlich erkennbar und liegt bei etwa 10.000 min⁻¹ und 100 Nm. Darüberliegende Belastungen steigern

die Motorverluste so stark, dass maximale Kühlung erforderlich ist – unabhängig von der Zieltemperatur.

Der Niedriglastbetrieb bei geringen Drehzahlen mit hoher Zieltemperatur beginnt bei etwa 100 °C. In diesem Bereich wird der elektrischen Maschine wenig Wärme entzogen. Auch das Kühlmittel bleibt nahe 100 °C. Bei Lastpunkten über der Grenzlinie, bei 9000 min⁻¹ mit 75 Nm sowie 14.000 min⁻¹ mit 0 Nm, lässt sich das Regelungsziel mit Temperaturen von 140 °C erreichen.

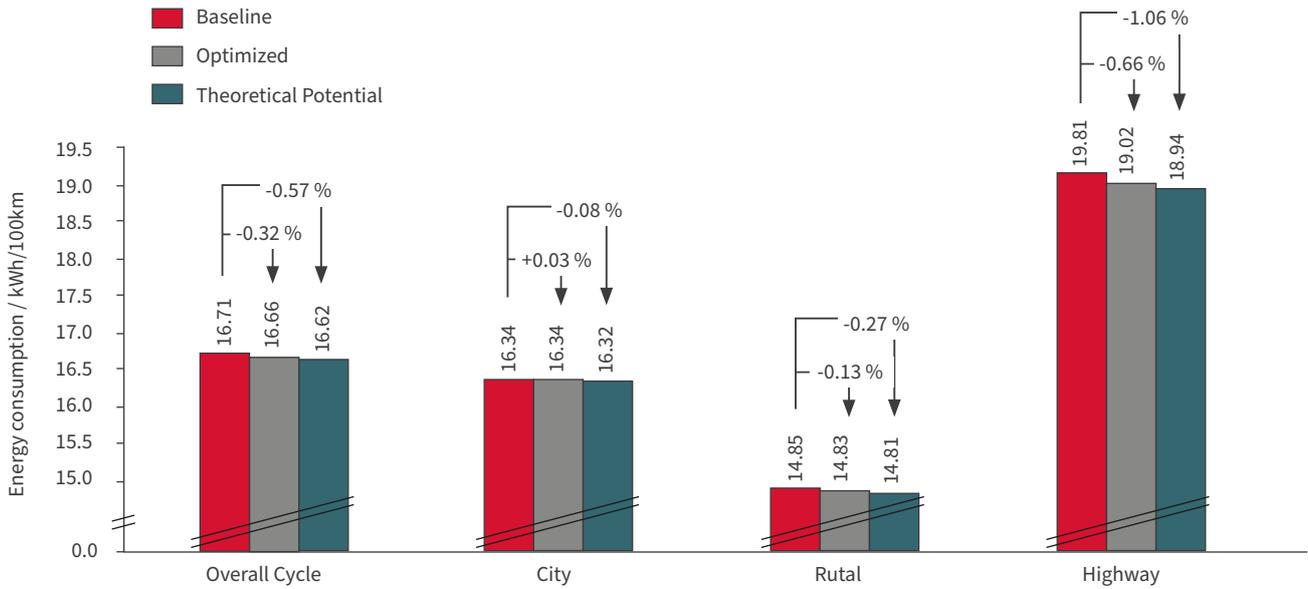
Die Anwendungsfälle im Detail: Der „Eifelzyklus“ und der WLTC

Als ersten Anwendungsfall wählte FEV als realen Zyklus eine Strecke von 87,6 km, die überwiegend durch die Eifel führt. 20 Prozent dieses Fahrzyklus bestehen aus einer Fahrt durch städtische Umgebung (City), 44 Prozent aus einer Fahrt durch ländliche Umgebung (Rural) und 36 Prozent aus Autobahnfahrt (Highway). Die Regelstrategie mit aktiver thermischer Feldschwächung (Optimized), welche das Aufheizen des Systems fördert, erzielt über die gesamte Fahrstrecke (Overall Cycle) eine Energieeinsparung von bis zu 0,32 Prozent im Vergleich zur herkömmlichen Regelstrategie (Baseline), wie in Abbildung 12 dargestellt. Das maximale Potenzial, welches sich ohne Berücksichtigung der thermischen Träg-

heit ergibt, liegt für den gesamten Zyklus bei 0,57 Prozent (Theoretical Potential). Ebenfalls in Abbildung 12 dargestellt sind die Einsparungen, die sich auf den Teilabschnitten des Fahrzyklus ergeben.

Im WLTC-Fahrzyklus für ein Klasse-3-Fahrzeug, welchen die EU auch zur Fahrzeughomologation vorschreibt, setzen elektrische Maschinen die meisten Energieanteile bei eher geringen Drehmomenten um (vergleiche Abbildung 9). Die Energieeinsparungen für diese Fahrzyklen sind in Abbildung 13 dargestellt. Verglichen wird wieder die Regelstrategie mit aktiver thermischer Feldschwächung. Einmal für den Fall, dass die elektrische Maschine zu Beginn des Fahrzyklus noch kalt ist (Optimized, cold) und einmal für den Fall, dass die Maschine zu Beginn des Zyklus bereits aufgewärmt ist (Optimized, warm). Im Rahmen der Prozedur muss der Zyklus sowohl kalt als auch warm durchfahren werden.

Bei einer zu Beginn des Zyklus kalten E-Maschine sind die Effekte der aktiven thermischen Feldschwächung im WLTC eher gering. Bei zu Beginn warmer Maschine beträgt die Gesamtenergieeinsparung 0,62 Prozent. Für ein E-Fahrzeug mit 500 km Reichweite ergibt sich durch die Gewichtung der beiden Zyklen eine Einsparung von 0,59 Prozent. Die deutlichsten Vorteile ergeben sich in den Hochge-



© Vergleich der Energieeinsparungen durch thermische Feldschwächung bei einem Kompakt-BEV im „Eifelzyklus“

schwindigkeitsabschnitten (Highway). Im warmen Zyklus kommt die Highway-Phase nach einer umfassende Aufwärmphase und es kann eine Energieeinsparung von etwa einem Prozentpunkt erreicht werden.

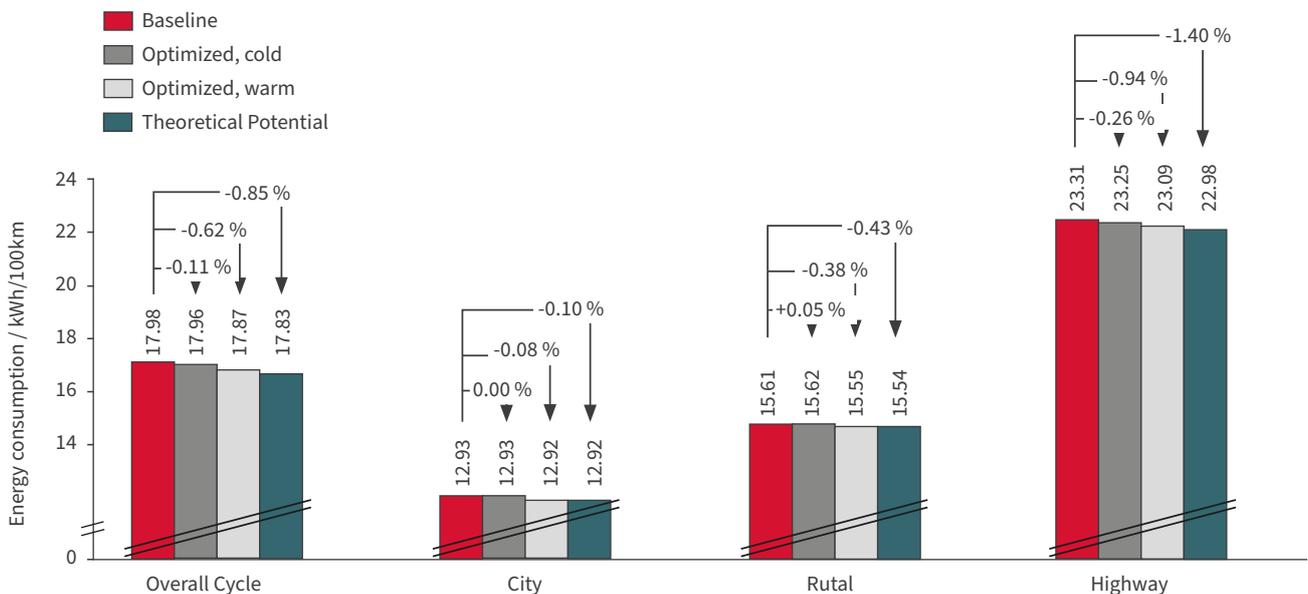
Ein noch größeres Einsparpotenzial wird die aktive thermische Feldschwächung für kommende E-Motor-Generationen bieten. Erste FEV Folgestudien bestätigen das. Denn die neuen Maschinen werden eine noch höhere Leistungsdichte haben. Die Steigerung der Leistungsdichte hat, neben

den Effekten der Gewichts und Ressourceneinsparung, weitere Vorteile für die aktive thermische Feldschwächung. Durch eine erhöhte Leistungs- und damit auch Verlustdichte sinken die Aufheizzeiten deutlich, weshalb sich Hochdrehzahl-/ Leichtbaukonzepte insbesondere für die thermische Feldschwächung eignen werden. Höhere Verlustdichten ergeben jedoch auch neue Herausforderungen für innovative Kühlkonzepte. Eine Ölkühlung für den Rotor kann ergänzend eingesetzt werden, um die Leistungsdichte von elek-

trischen Maschinen weiter zu steigern und die Rotortemperatur von der Statortemperatur zu entkoppeln, wodurch sich ein weiterer Freiheitsgrad in der Temperaturregelung ergibt.

Von

Dr. Konrad Herold · herold_k@fev.com
 Dr. Andreas Krings · krings_a@fev.com
 Dr. Michael Schröder · schroeder_mi@fev.com



© Vergleich der Energieeinsparungen durch thermische Feldschwächung bei einem Kompakt-BEV im WLTC

KONFERENZ

ELEKTRIFIZIERUNG TREIBT NACHHALTIGE MOBILITÄT VORAN, FAHRPLAN FÜR E-FUELS STEHT AUS

Ein leichterer CO₂-Rucksack von E-Autos, der Transformationsturbo Batterietechnologie, die Elektrifizierung des Schwerlastverkehrs und der Wasserstoff-Verbrenner als Ergänzung: Um die Ziele des Pariser Klimaschutzabkommens zu erreichen, zeichneten die Teilnehmer der internationalen FEV Fachkonferenz „Zero CO₂ Mobility“ im November 2021 in Aachen ein technologieoffenes Bild mit unterschiedlichen Lösungsansätzen. FEV schätzt als Gastgeber der Konferenz Elektrifizierung und Wasserstoff als wichtigste Treiber einer nachhaltigen Mobilität ein, vermisst jedoch gleichzeitig einen klaren Fahrplan zur verstärkten Nutzung von E-Fuels.



ZERO
CO₂
MOBILITY



Die meisten vorgestellten Technologieansätze waren noch Zukunftsmusik, als FEV vor sechs Jahren zur Premiere der „Zero CO₂ Mobility“ eingeladen hatte. Zum Einstieg in die diesjährige Konferenz, die unter Einhaltung aller Corona-Schutzmaßnahmen wieder als Präsenzveranstaltung in Aachen stattfinden konnte, betonte Dr. Norbert W. Alt, COO FEV Group, das hohe Tempo des Transformationsprozesses. So könnten die Szenarien speziell zur Marktentwicklung rein batterieelektrischer Antriebe gar nicht aggressiv genug ausfallen. So gehen jüngste FEV Prognosen bei Umsetzung des aktuell in Brüssel diskutierten Szenarios von einer über 85-prozentigen Quote elektrifizierter Pkw bei den Neuzulassungen in Europa bereits für das Jahr 2035 aus.

CO₂-Neutralität entlang der Wertschöpfungskette

Die Fahrzeughersteller setzen diesen Transformationsprozess mit hoher Geschwindigkeit um:

Am Beispiel des ID.3 skizzierte beispielsweise Volkswagen sein Defossilisierungsprogramm, mit dem der Konzern bis 2030 eine nahezu klimaneutrale individuelle Mobilität bei Pkw realisieren will. Die drei wichtigsten Stellhebel: Vermeiden, verringern und, falls erforderlich, kompensieren der CO₂-Emissionen innerhalb der gesamten Wertschöpfungskette. Zu den Maßnahmen gehören unter anderem die Umstellung von Produktionsanlagen auf 100 Prozent erneuerbare Energiequellen, die Nutzung von Kreislaufwirtschaft für die Rückgewinnung von Rohstoffen für Batterien sowie Investitionen in die Erzeugung grüner Energie oder klimaneutraler Kraftstoffe. Verbleibende Lücken in der CO₂-Bilanz sollen beispielsweise durch die Unterstützung von Regenwaldprojekten geschlossen werden. Bereits heute gehen Berechnungen davon aus, dass E-Autos in Europa über ihren gesamten Lebenszyklus lediglich halb so viel CO₂-Emissionen produzieren wie vergleichbare Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren. Insbesondere klimaneutralere Herstellungsverfahren von Batterien sollen dazu beitragen, den sogenannten CO₂-Rucksack von E-Fahrzeugen deutlich zu verringern.



Hohe Energiedichte, mehr Recycling, bessere Infrastruktur

Zu den wichtigsten Beschleunigern der Elektrifizierung zählt die Batterietechnologie: Hier stehen nach Meinung der Experten erheblich schneller als erwartet kostengünstigere, leistungsfähigere Lösungen zur Verfügung. Stichwort Festkörperbatterien: Bei der FEV Konferenz wurde eine neue Feststoffbatterie von Prologium mit einer Energiedichte von fast 700 Wh/L vorgestellt, was gegenüber den aktuell in BEVs genutzten Batterien einer Verdoppelung der Kapazität entspricht. Ergänzend teilten Fachleute auf der Konferenz die Einschätzung, dass bis 2030 eine 95-prozentige Wiederverwendungsquote beim Batterie-Recycling möglich sein wird.



Auch im Bereich Ladeinfrastruktur für E-Autos skizzierten die Teilnehmer der Zero CO₂ Mobility eine Reihe neuer Ansätze, so zum Beispiel die On-Street-Charging-Lösung der Shell-Tochter Ubitricity. Sie wandelt Laternenmasten – allein in Europa existieren rund 90 Millionen – durch die Anbringung von Ladestationen in Ladepunkte um und nutzt dabei das bestehende Stromnetz.

Im Schwerlastverkehr sind alternative Antriebskonzepte ebenfalls längst auf der Überholspur. Im europäischen Fernverkehr werden

① Ein wichtiger auf der Konferenz besprochener Treiber der Mobilitäts-Transformation ist Wasserstoff



sich nach Meinung des Nutzfahrzeugherstellers Traton mittel- und langfristig batterieelektrische Lkw gegenüber dem Brennstoffzellen-Antrieb durchsetzen. Diese Erwartung wird begründet mit der höheren System- und Kosteneffizienz von E-Nutzfahrzeugen über den gesamten Lebenszyklus, gepaart mit höherer Leistungsfähigkeit, längerer Lebensdauer und niedrigerem Energiebedarf. Einzig bei einer sehr hohen Variabilität der Tagesreichweite und gleichzeitig großen lokalen Lücken in der Schnellladeinfrastruktur bliebe der Brennstoffzellen-Lkw demnach im Vorteil. Auch Vertreter des EU-Projekts „CoachHyfied“ sehen bei der Umrüstung von Reisebussen auf Brennstoffzellenantrieb hohen Nutzen, um ressourcenschonend bestehende Fahrzeugflotten klimaneutral weiterverwenden zu können.



Wasserstoff On- und Non-Road

Wasserstoff gilt dennoch als zweiter Treiber der Mobilitäts-Transformation. So wurde in Aachen unter anderem die Frage nach der Bereitstellung mit dem Hinweis auf das bestehende europäische Erdgas-Pipeline-Netz beantwortet: In der Vereinigung „European Hydrogen Backbone“ haben sich 23 europäische Gasversorger zusammengeschlossen, die bis 2040 rund 40.000 Kilometer Erdgas-Pipelines für den Wasserstoff-Transport umrüsten können. Einig waren sich die Experten zudem darin, dass der Wasserstoff-Verbrennungsmotor eine kostenattraktive Lösung vor allem für schwere Nutzfahrzeuge darstellt, aber auch für Non-Road-Anwendungen wie Schifffahrt und Luftverkehr eine Option auf verbesserte CO₂-Bilanzen bietet.

© Bei FEVs Zero CO₂ Mobility-Konferenz präsentierten Entscheider der Automobil- und Energiebranche die neuesten Trends und Lösungen für eine CO₂-neutrale Mobilität



E-Fuels: Klare Regeln bei Reduktion von fossilen Kraftstoffen

Der Betrieb von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren mit Hilfe von E-Fuels bildete bei der Konferenz den dritten, mit Blick auf die Bestandsflotten unverzichtbaren Baustein im Transformationsprozess zu einer klimaneutralen Mobilität. Parallel zum Kohleausstiegsfahrplan bis 2035 seien jedoch klare Regularien für die Reduzierung von fossilen Kraftstoffen bei gleichzeitig verstärktem Einsatz von E-Fuels erforderlich, betonte Dr. Alt in seinem Schlusswort. Diese müssten unter anderem die Einführung von E-Fuel-Quoten, aber auch einen Fahrplan für Mineralölanbieter und Tankstellenbetreiber bis hin zum vollständigen Verbot fossiler Kraftstoffe beinhalten.

Fazit

Die Elektromobilität kommt deutlich schneller als erwartet, was im Umkehrschluss auch ein früheres Aus als angenommen für fossile Kraftstoffe in Verbrennungsmotoren bedeutet. Die Verpflichtung der Industrie zu Nachhaltigkeit in der gesamten Wertschöpfungskette wird unterstrichen durch die zunehmende Umstellung auf erneuerbare Energiequellen, durch Kreislaufwirtschaft und Wiederverwertung, insbesondere von Batterien. Der Wasserstoffmarkt steht in den Startlöchern, gleiches gilt für die Serieneinführung von Brennstoffzellenfahrzeugen. Der Wasserstoff-Verbrennungsmotor ist eine unverzichtbare Ergänzung auf dem Weg zur Erreichung der Klimaziele des Pariser Abkommens, ebenso der Einsatz von E-Fuels in den Bestandsflotten. Beides lässt sich nur mit Hilfe politischer Förderung und entsprechender Vorgaben umsetzen.

FEV ENERGY

NEUES GESCHÄFTSFELD FEV ENERGY BIETET LÖSUNGEN FÜR ENERGIESEKTOR

Als global führender Dienstleister in der Fahrzeug- und Antriebsentwicklung verfügt FEV über starkes, historisch gewachsenes Know-how bei der Nutzung alternativer Energien und Antriebstränge im Mobilitätssektor. Diese Expertise wird nun auch der Energiewirtschaft und Industrie bei deren Defossilisierung zugutekommen. Hierfür hat das Unternehmen mit FEV Energy einen neuen Geschäftsbereich gegründet. Von der Erzeugung über den Transport und die Speicherung bis hin zur Verwendung grüner Energie kann FEV künftig für die komplette Wertschöpfungskette Dienstleistungen aus einer Hand anbieten.



Keine erfolgreiche Energiewende ohne Sektorenkopplung: Um die weltweiten CO₂-Emissionen im gebotenen schnellen Tempo zu reduzieren, sind Lösungen gefragt, welche die einzelnen Sektoren – Strom- und Wärmeerzeugung, Mobilität und Industrie – intelligent vernetzen und ganzheitlich optimieren. Nur so lassen sich die Herausforderungen der Transformation hin zu einer CO₂-neutralen Gesellschaft durch Nutzung der erneuerbaren Energiequellen wie Sonnen- und Windkraft meistern. Vor diesem Hintergrund ist es ein konsequenter Schritt, das Know-how aus dem Mobilitätsbereich auch auf den Strom- und Wärmesektor zu übertragen. Der neue Geschäftsbereich FEV Energy ergänzt dabei die bestehenden Geschäftsfelder in idealer Weise.

Zahlreiche potenzielle Betätigungsfelder

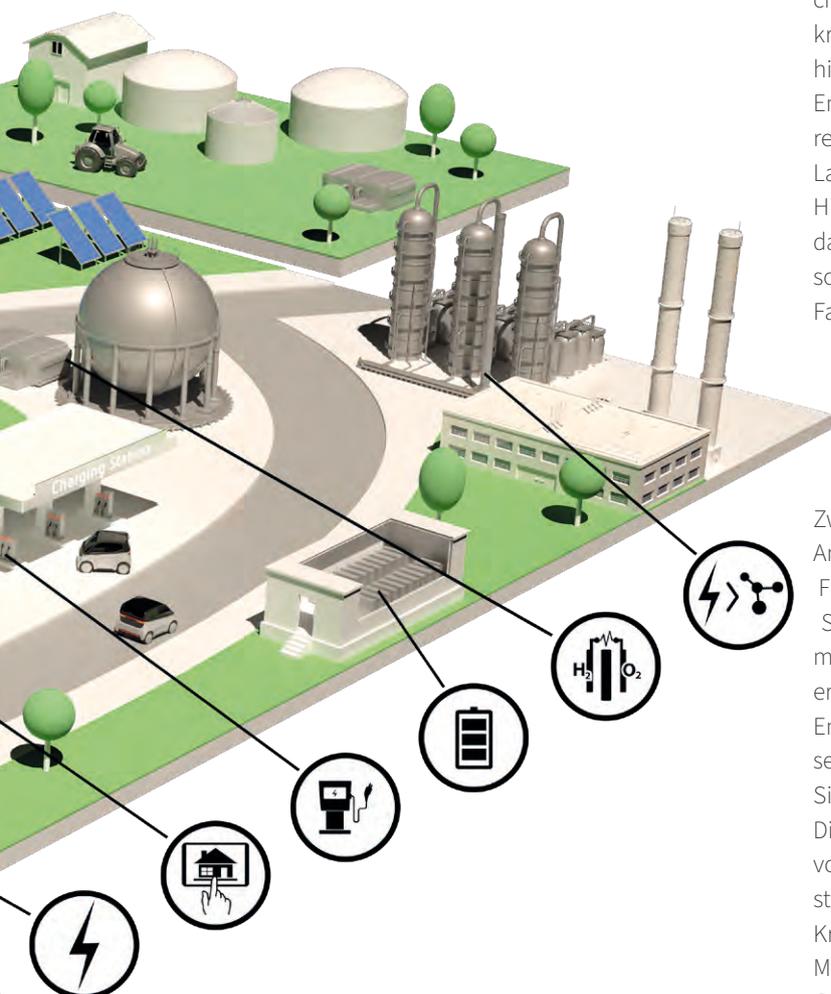
Die neuen Geschäftsaktivitäten sind dabei so vielfältig wie die Möglichkeiten zur Erzeugung, Speicherung, Transport und Verwendung erneuerbarer Energien selbst: beispielsweise die Systemauslegung von Photovoltaikanlagen, die optimale Dimensionierung und Regelung von Photovoltaik-Batteriespeicher-Wärmeerzeugersystemen, von Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerken oder von stationären Energiespeichern. Darüber hinaus unterstützt FEV Energy auch bei der Ausarbeitung von Energieaudits und Nachhaltigkeitsberichten. Im Automotive-Bereich ist die Entwicklung und Integration des bidirektionalen Lademanagements (BDL) ein vielversprechendes neues Gebiet. Hierfür entwickelt FEV zum Beispiel smarte Regelstrategien für das Energiemanagement im häuslichen und industriellen Umfeld sowie zum intelligenten Be- und Entladen der angeschlossenen Fahrzeugbatterien.

FEV überträgt vorhandenes Know-how

Für alle genannten Anwendungen übernimmt FEV Energy die Rolle eines Systemintegrators. Dazu ist das Komponenten-Benchmarking als Kernkompetenz von FEV der Schlüssel: Zwar ergeben sich mit neuen Märkten und Kunden auch neue Anforderungen an die verwendeten Bauteile, ihre technische Funktionsweise bleibt jedoch weitgehend unverändert. Im ersten Schritt fokussiert sich FEV Energy auf Geschäftsmodelle, die sich mit der vorhandenen Entwicklungs- und Testkompetenz schnell erschließen lassen. Dazu zählen u.a. Energieaudits, Testung und Entwicklung von Brennstoffzellenheizkraftwerken und Elektrolyseuren, Entwicklung mobiler Lade- und Tankinfrastrukturen sowie Simulation und Projektierung von Power-to-X-Anwendungen. Diese Technologien umfassen die Umwandlung und Speicherung von erneuerbarem Strom mit CO₂ in grüne Gase wie Wasserstoff oder Methan (Power-to-Gas), in flüssige Energieträger wie Kraft- und Brennstoffe (Power-to-Liquids) für eine nachhaltige Mobilität und in Gebäuden oder zur Synthese von chemischen Grundstoffen für die Industrie (Power-to-Chemicals). Zur Zielgruppe zählen Industriekunden im Business-to-Business-Umfeld.

Kontakt:

Dr. Benedikt Heuser · heuser@fev.com



TREFFEN SIE ÜBER 6.300 FEV EXPERTINNEN UND EXPERTEN IN UNSEREN INTERNATIONALEN ENGINEERING- UND SERVICE-ZENTREN



IMPRESSUM

SPECTRUM Nr. 74 · Ausgabe 01/2022
Redaktion
Marius Strasdat · FEV Europe GmbH
Gestaltung
David Nyeki · FEV Consulting GmbH
Sebastian Aberfeld · FEV Consulting GmbH

LESERSERVICE

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

FEV IM INTERNET

Besuchen Sie uns online:

www.fev.com

 /fevgmbh

 /companies/fevgmbh

 /company/fev-europe



ENTER

THE NEXT LEVEL

Wer sagt, dass du als Ingenieur
nur am Schreibtisch sitzt?

Björn, Projektmanager, war schon als Student bei FEV tätig.
Heute entwickelt er innovative Technologien vom Konzept bis zur
Produktion und testet sie direkt auf der Straße.



JOIN THE FEV TEAM
www.fev.com/careers



KONTAKT

FEV Europe GmbH
Neuenhofstraße 181
52078 Aachen
Deutschland

Tel +49 241 5689-0
Fax +49 241 5689-119
marketing@fev.com

FEV North America, Inc.
4554 Glenmeade Lane
Auburn Hills
MI 48326-1766 · USA

Tel +1 248 373-6000
Fax +1 248 373-8084
marketing@fev-et.com

FEV China Co., Ltd.
168 Huada Road
Yanjiao High-Tech Zone
065201 Sanhe City
Langfang Hebei Province
China

Tel +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 410507 · Indien

Tel +91 2114 666-000
fev-india@fev.com