



SPECTRUM

**"INNOVATIVER VORTRIEB FÜR
DEN VERKEHR DER ZUKUNFT"**

FEV.io – Mobilität
digitalisieren

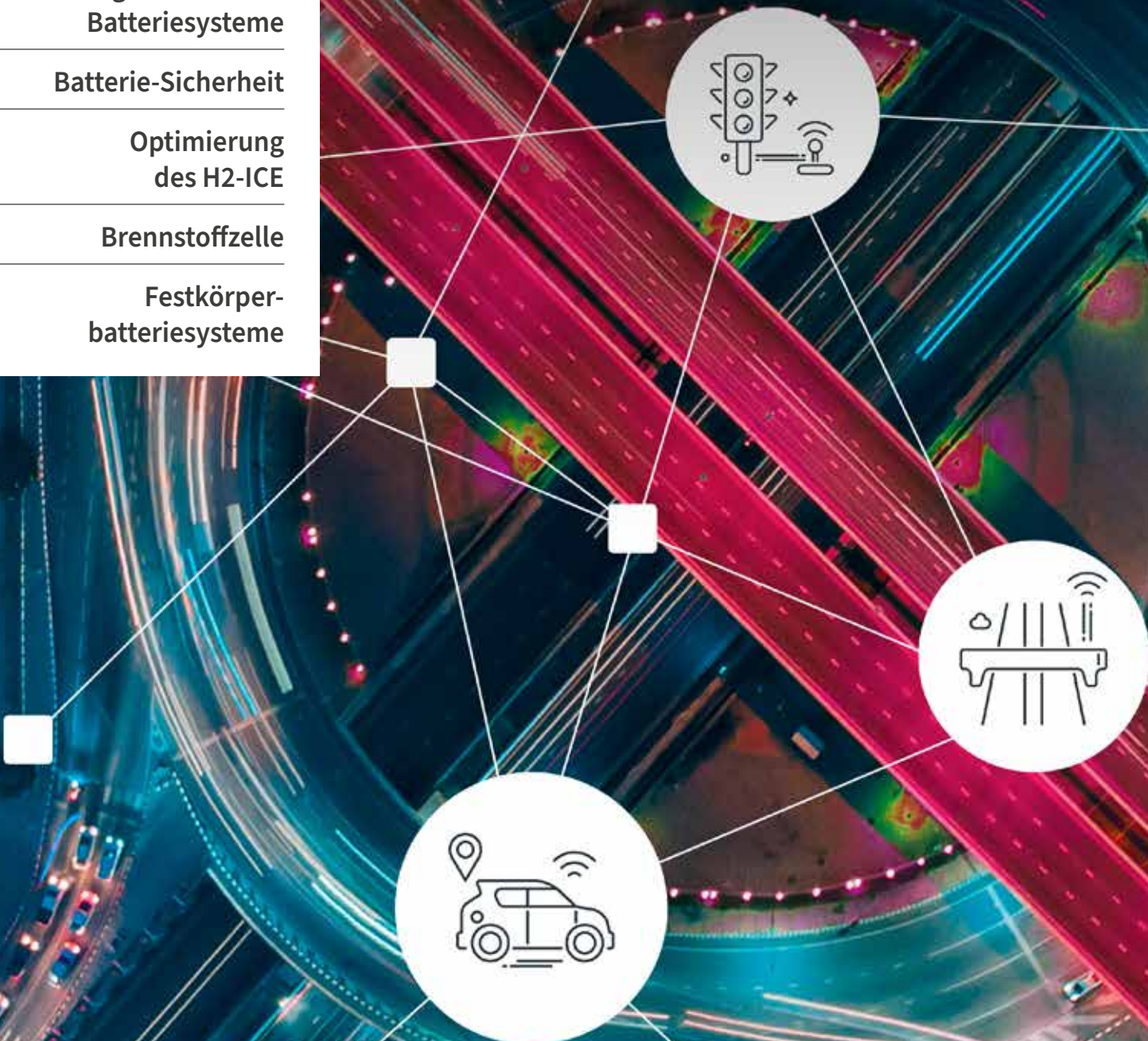
Maßgeschneiderte
Batteriesysteme

Batterie-Sicherheit

Optimierung
des H2-ICE

Brennstoffzelle

Festkörper-
batteriesysteme





Liebe Leserinnen und Leser,

intelligente, sichere und nachhaltige Mobilität ist heute nicht mehr wegzudenken, wenn man an zeitgemäße Fortbewegung denkt. Tatsächlich stehen wir bei den Möglichkeiten, die einmal für jedermann zugänglich sein sollen, erst am Anfang. Für die breite Realisierung sind noch einige Hürden zu nehmen: Level-3-Systeme müssen für alle relevanten Szenarien abgesichert werden, die Vernetzung von Infrastruktur, Mensch und Fahrzeug erfordert gemeinsame Standards. Darüber hinaus werden Plattformen benötigt, um kontinuierliche Software-Updates zu ermöglichen. Mit der Gründung des eigenen globalen Geschäftszweigs FEV.io tragen wir dieser Entwicklung Rechnung und bündeln unsere hohe Kompetenz in diesen Zukunftstechnologien. Wir freuen uns sehr, Ihnen in dieser Ausgabe FEV.io näher vorzustellen und Einblicke in die Kompetenzen unserer Kolleginnen und Kollegen zu geben, die an der spannenden Entwicklung und Verbindung komplexer Verkehrsökosysteme arbeiten.

Außerdem präsentieren wir Ihnen in dieser SPECTRUM-Ausgabe Entwicklungslösungen von FEV für individuelle Batteriesysteme. Abhängig von Antriebsart und Auslegungszielen, sowie weiteren Aspekten wie BMS und Integration, ergeben sich für niedrige und hohe Spannungen unterschiedliche Entwicklungsherausforderungen, für die wir unterschiedliche, zuverlässige Ansätze verfolgen. In einem weiteren Artikel gehen wir auf die Batteriesicherheit ein, die durch höhere Energie- und Packungsdichten von Batteriesystemen, wie sie in modernen Fahrzeugen mit elektrifizierten Antriebssträngen eingesetzt werden, von hoher Bedeutung ist. Wir veranschaulichen in diesem Zusammenhang, wie die enge Integration von Entwicklung und Versuch zu wirkungsvollen Lösungen führt.

Zur Erreichung der Klimaziele ist im Mobilitätssektor Technologieoffenheit essentiell. Vielversprechende Ansätze liefern hier H₂-Applikationen wie die Brennstoffzelle sowie der Wasserstoffverbrennungsmotor, wobei die gängigste Anwendung das Otto-Verbrennungsprinzip mit Fremdzündung ist. Auf den folgenden Seiten zeigen wir Optimierungspotenziale des Antriebsstrangs auf, um die Vorteile eines solchen Motors zu maximieren. Auch bei der Nutzfahrzeugflotte gelten strenge Vorgaben, deren CO₂-Emissionen bis 2030 gegenüber dem Flottendurchschnitt von 2019 um 30 Prozent zu senken. Das erfordert weitere Verbesserungen des Antriebsstrangs von schweren Nutzfahrzeugen. Da der Verbrennungsmotor auch in den kommenden Jahrzehnten für Nutzfahrzeuge sehr wichtig sein wird, ist eine kontinuierliche Optimierung und Effizienzsteigerung anzustreben. Wir präsentieren in dieser Ausgabe einen möglichen Weg zur Steigerung des Motorwirkungsgrads auf ein Niveau von 55 Prozent.

Ich wünsche Ihnen eine spannende Lektüre. Neuigkeiten und weitergehende Informationen zu FEV finden Sie übrigens auf unseren Online-Kanälen, beispielsweise www.fev.com. Gerne stehen Ihnen auch unsere Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter bei Fragen zur Verfügung.



Professor Dr.-Ing. Stefan Pischinger
Vorsitzender der Geschäftsführung und
Geschäftsführender Gesellschafter der
FEV Group GmbH

6

FEV.io

MOBILITÄT DIGITALISIEREN,
MENSCHEN VERNETZEN.



warn



steer



brake

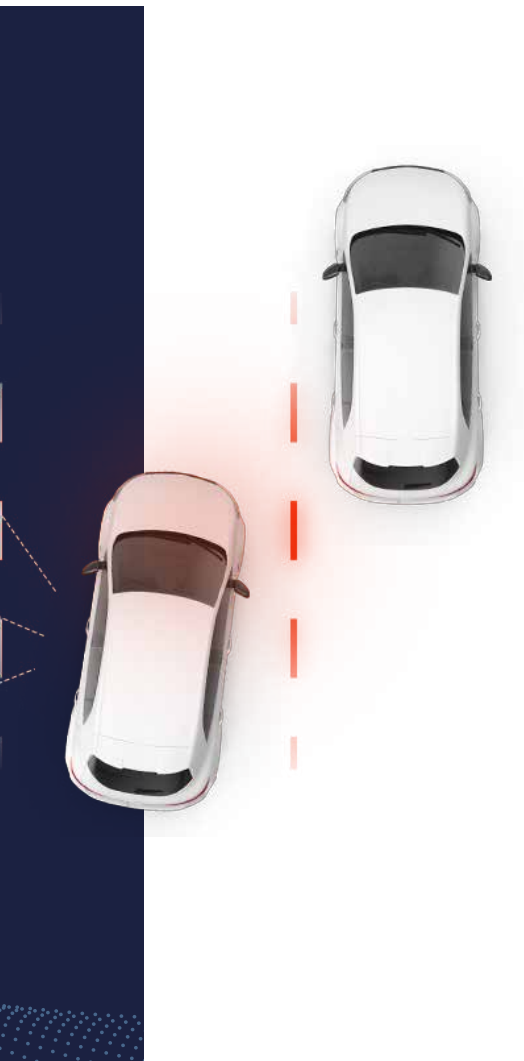
No Propagation – Sicherheitsziel
für Premium-Batteriesysteme



16

Der Weg zum 55 %-
BTE-Nutzfahrzeugmotor





AUS FORSCHUNG UND ENTWICKLUNG

6 FEV.io – Mobilität digitalisieren,
Menschen vernetzen

10 Maßgeschneiderte Batteriesysteme für
Einstiegs- bis hin zu Hochleistungsanwendungen

16 No Propagation – Sicherheitsziel
für Premium-Batteriesysteme

22 Antriebsstrangoptimierung
beim H₂-Verbrennungsmotor

32 Der Weg zum
55 %-BTE-Nutzfahrzeugmotor

NEWS

38 FEV unterstützt GCK: Brennstoffzellen-
technologie erobert Rallye Dakar

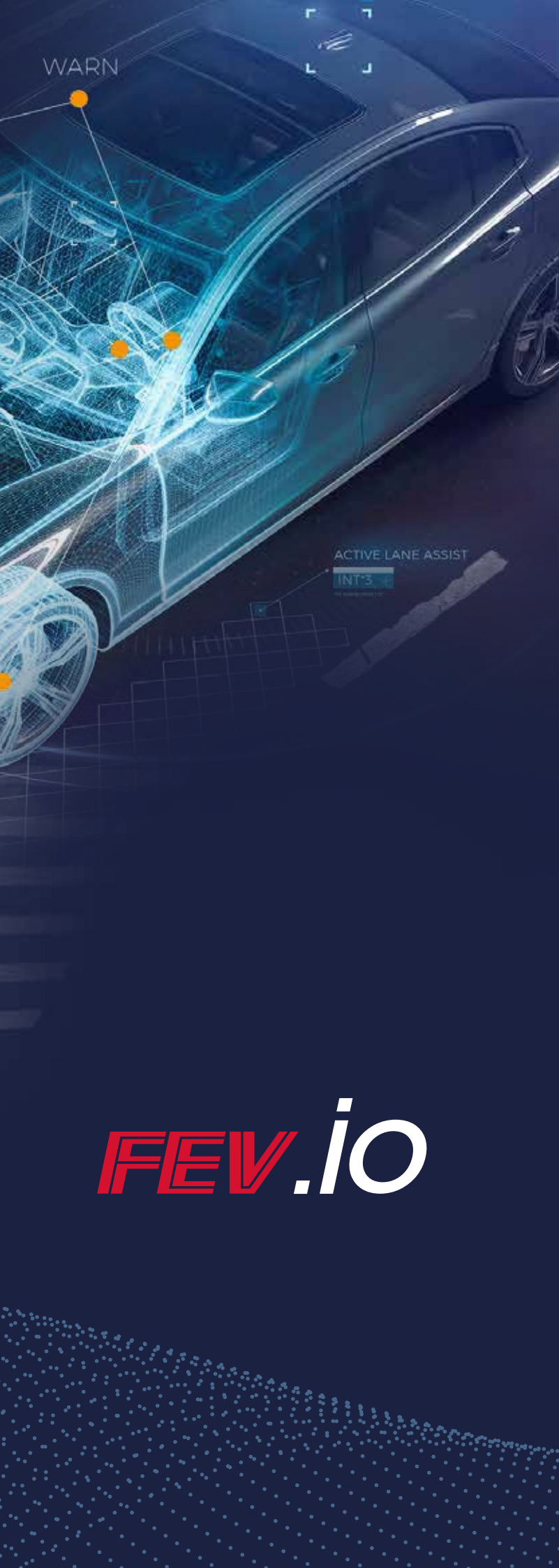
40 FEV und ProLogium entwickeln
Festkörperbatteriesysteme



SOFTWARE & ELEKTRONIK

**FEV.io – MOBILITÄT DIGITALISIEREN,
MENSCHEN VERNETZEN.**





FEV.io

Intelligente Fahrzeuge und Mobilitätskonzepte sind in aller Munde. Jeder spricht über autonom fahrende PKW, Busse die selbstständig Personen befördern und über die Vernetzung von Infrastruktur, Mensch und Fahrzeug, um Mobilität für jeden zu ermöglichen. Für die breite Realisierung sind jedoch noch Hürden zu nehmen: Level-3-Systeme müssen für alle relevanten Szenarien abgesichert werden, Vernetzung erfordert gemeinsame Standards. Darüber hinaus werden Plattformen benötigt um kontinuierliche Software-Updates zu ermöglichen. Seit dem 25. April 2022 stellt sich FEV mit seiner neuen globalen Marke FEV.io stolz diesen und vielen anderen Herausforderungen, um intelligente, sichere und nachhaltige Mobilität für jedermann Realität werden zu lassen.

FEV.io zeichnet sich durch ein tiefes Verständnis für Software und Elektronik aus, kombiniert mit detailliertem Fachwissen in allen Fahrzeugdomänen, die für die Entwicklung intelligenter Mobilitätslösungen erforderlich sind. Hinzu kommt ein das gesamte Ökosystem übergreifendes Verständnis von Datenflüssen zwischen Fahrzeug und Cloud. Diese einzigartige Technologie-Kompetenz ermöglicht die Entwicklung und Verbindung komplexer Verkehrssysteme. Zwei Leistungsbeispiele geben einen praktischen Einblick in das Projektgeschäft.

Kosteneffiziente ADAS-Lösungen

Bei der Einführung von Level-3-Fahrerassistenzsystemen (Automated Driving Systems, ADS) kommt es aktuell zu Verzögerungen. Ein wesentlicher Grund dafür ist die herausfordernde Definition eines spezifischen Szenarioraums. So ist es weder praktikabel noch kosteneffizient, autonome Funktionen ausschließlich auf der Straße zu validieren. Daher spielt bei der Systemvalidierung die Virtualisierung eine entscheidende Rolle. Qualitativ hochwertige Szenariodaten beschreiben eine spezifische Fahrsituation, wie beispielsweise den Spurwechsel auf einer dreispurigen Autobahn, inklusive aller Umwelteinflüsse wie etwa einer tief stehenden Sonne oder reflektierenden Straßen. Diese Daten sind für die Entwicklung autonomer Fahrzeuge unerlässlich. Durch intelligentes Datenmanagement in Kombination mit einem szenariobasierten Systems-Engineering-Ansatz stellt FEV.io sicher, dass die von Fahrzeugen aufgezeichneten Szenariodaten in den verschiedenen Validierungsphasen eines autonomen Fahrsystems eine ausreichende Qualität aufweisen.

Hierfür bietet FEV.io bereits Lösungen an und arbeitet gemeinsam mit einem marktführenden Automobilhersteller an einem System, das die qualitative Bewertung von Szenariodaten ermöglicht. Neben der Aufstellung von Anforderungen hat FEV.io einen Leistungskatalog für verschiedene Datenquellen erstellt. Darüber hinaus wurden Standards für die automatisierte Datenübertragung aus diesen Quellen in die Cloud definiert. Dies ermöglicht es Kunden künftig, die im Rahmen der Gesamtstrategie am besten geeigneten Datenquellen auszuwählen und dabei ein Höchstmaß an Qualität und eine effektive Kostenkontrolle zu gewährleisten.

Die Vereinigung von Information, Unterhaltung, Produktivität und Konnektivität.

Ein weiteres Beispiel für die Herausforderungen intelligenter Mobilitätssysteme ist die Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine, kurz HMI (Human-Machine-Interface). Es wird erwartet, dass automatisierte Busse und Taxis in Zukunft eine Schlüsselrolle im öffentlichen Verkehr spielen und ein einzigartiges Mobilitätsenerlebnis bieten werden. Für viele Menschen wird dies auch das erste Mal sein, dass sie die Kontrolle an eine Maschine übergeben, was ein Höchstmaß an Vertrauen erfordert. Das HMI-System muss daher eine Schlüsselrolle spielen, um dieses Vertrauen und Zufriedenheit bei den Fahrgästen zu schaffen.

Für einen automatisierten, selbstfahrenden Kleinbus hat FEV.io einen intuitiven Client entwickelt, der auf den Anforderungen unserer Gesellschaft basiert. Dazu wurden optimal geeignete visuelle und akustische Systeme kombiniert, welche ein siche-

res, spannendes und komfortables Reiseerlebnis garantieren. Unterstützt wurde dies durch natürlichsprachliche Assistenten wie Amazons Alexa, die durch eine menschenähnliche Kommunikationserfahrung ein hohes Maß an Vertrauen schaffen. Intelligente Displays liefern zusätzliche Routeninformationen und Sicherheitstipps.

Um dieses System erfolgreich zu entwickeln, mussten Daten aus verschiedenen Bereichen wie dem Antriebsstrang, dem Fahrwerk und dem Backend eingegeben, interpretiert, übersetzt und ausgegeben werden. Durch die erfolgreiche Modellierung der gesamten Systemarchitektur, einschließlich aller notwendigen Schnittstellen, hat FEV.io die Grundlage für eine vereinfachte und effiziente Zusammenarbeit zwischen allen Entwicklungspartnern geschaffen.

Das Leistungsportfolio von FEV.io

Diese zwei Beispiele sind nur ein Auszug aus dem Solution Portfolio von FEV.io. Es teilt sich in sieben Bereiche auf und löst die zentralen Herausforderungen intelligenter Mobilität:

- Funktionale Sicherheit & Cyber Security
- Vernetzte Mobilität
- ADAS/AD
- Infotainment
- SW & EE Plattformen
- SW- & EE-Integration

Durch die Gesamtsystemkompetenz kann FEV.io Know-how entlang des gesamten Entwicklungszyklus von Mobilitätslösungen bereitstellen und als Teil der FEV Gruppe Kunden das gesamte Spektrum der Fahrzeugentwicklung angeboten werden – von der Konzeption bis zum Marktstart.

Kontakt

Dr. Johannes Richenhagen · richenhagen@fev.com

IM GESPRÄCH MIT DR. JOHANNES RICHENHAGEN, GESCHÄFTSFÜHRER DER FEV.io IN DEUTSCHLAND

Anlässlich der Gründung von FEV.io sprachen wir mit Dr. Johannes Richenhagen, der mit Dr. Johannes Scharf die Geschäftsführung von FEV.io in Deutschland übernimmt.

Wofür steht eigentlich das ".io" im Firmennamen?

Dr. Johannes Richenhagen: ".io" steht für Input-Output. Mit diesem Namen wollen wir unsere digitale Herkunft betonen, aber auch die Botschaft vermitteln, dass wir ein verlässlicher Partner sind, der den Input unserer Kunden aufnimmt, ihn kundengerecht transformiert und daraus einen wertvollen Output liefert. Dabei leben wir echte Zusammenarbeit und gestalten Schnittstellen zwischen Partnern und Technologiebereichen stets transparent und übersichtlich.

Warum hat sich FEV gerade jetzt für das Spin-Off und die Etablierung einer neuen Marke in diesem Segment entschieden?

Dr. Johannes Richenhagen: In der FEV Group haben wir schon früh die Bedeutung von Software und Elektronik im Automobilbereich und softwaredefinierte Mobilität erkannt. Fahrzeuge werden schon heute durch Softwarefunktionen und weniger durch ihre sonstigen Eigenschaften definiert. Darum haben wir uns im Jahr 2019 dazu entschieden, alle Aktivitäten in diesem Bereich in einer eigenen globalen Business Unit zu bündeln. Mit dieser strategischen Entscheidung wurden die Weichen für das sehr erfolgreiche Software- und Elektronik- oder kurz "Digital"-Geschäft bei FEV gestellt. Da die Kundenbedürfnisse und das Entwicklungstempo in diesem digitalen Segment ein sehr spezielles Setup in Bezug auf Prozesse, Arbeitsumgebung und Unternehmenskultur erfordern, benötigten wir eine agile und sich schnell anpassende Struktur und Unabhängigkeit. Mit der Gründung von FEV.io werden wir dies nun sicherstellen, gleichzeitig mit der FEV Group aber auch die gesamte Energie- und Mobilitätssystementwicklung einschließlich der Fahrzeug- und Antriebsstrangentwicklung "aus einer Hand" für unsere Kunden anbieten.



Erfahren Sie mehr über
Intelligente Fahrzeuge
und Mobilitätskonzepte
www.fev.io

Arbeitet FEV.io mit Partnern zusammen?

Dr. Johannes Richenhagen: Um unseren Kunden die besten Mobilitätslösungen anzubieten, ergänzen wir die Kompetenzen unserer eigenen Experten bei Bedarf nahtlos um die besonderen Fähigkeiten und Kapazitäten unserer Partner. So sichern wir einen effizienten und maximalen Output im Sinne des Kunden.

Mit Wipro beispielsweise, einem weltweit führenden IT-Anbieter, bieten wir gemeinsame Lösungen bei der Unterhaltungselektronik und Clouddiensten an. Außerdem haben wir enge Partnerschaften mit Ibeo, einem Pionier für Lidar-Anwendungen im Automobilbereich, sowie LiangDao, bekannt für erstklassige Test- und Datenmanagementlösungen. So bündeln wir modernstes technologisches Know-how für die Entwicklung von automatisierten Fahrsystemen.

Das hört sich nach einem großartigen und einzigartigen Arbeitsumfeld an, wenn es um Software- und EE-Entwicklung geht. Werden aktuell Mitarbeiter gesucht?

Absolut! Wir suchen Pioniere und kluge Köpfe aus allen Domänen. Sowohl für FEV.io in Deutschland aber auch global. Interessenten finden weitere Informationen dazu auf der FEV Homepage im Karrierebereich. Alternativ freuen wir uns über Initiativbewerbungen an career@fev.com mit dem Stichwort „FEV.io“.

Vielen Dank für das Gespräch.

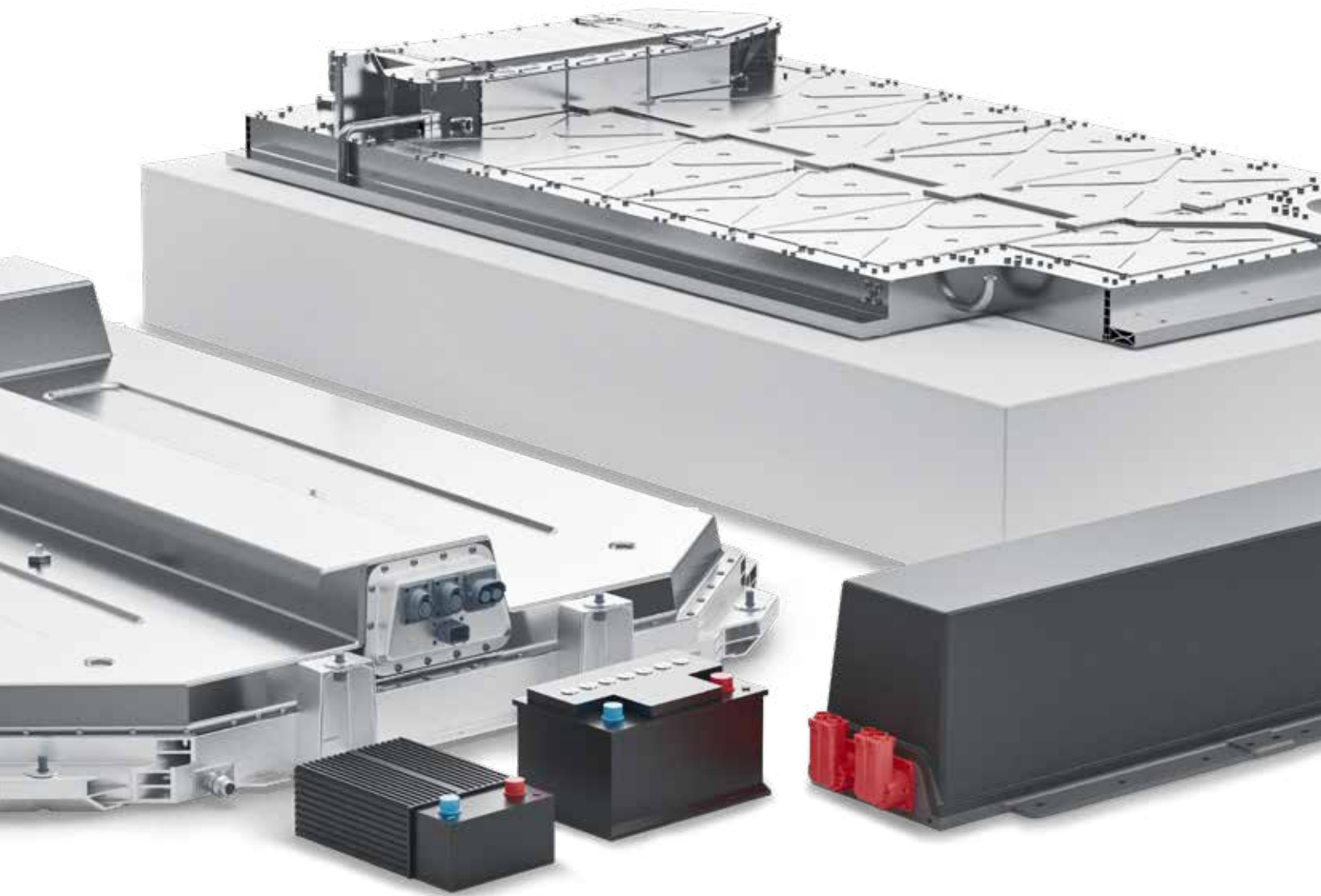
MASSGESCHNEIDERTE BATTERIE-SYSTEME FÜR EINSTIEGS- BIS HIN ZU HOCHLEISTUNGSANWENDUNGEN



Heute stammt etwa ein Viertel der weltweiten CO₂-Emissionen aus dem Verkehrssektor und drei Viertel der Verkehrsemissionen entfallen auf den Straßenverkehr. Dies zeigt die Notwendigkeit, den Kraftstoffverbrauch von Straßenfahrzeugen zu senken und Antriebsstränge zu elektrifizieren. Die Europäische Union hat klare Ziele zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Straßenfahrzeugen festgelegt, was zu einem zunehmend elektrifizierten Antriebsmix in den kommenden Jahren führen wird.

Da die Anforderungen in Bezug auf die Nutzung, die Marktnachfrage, die Gesetzgebung und die Vorschriften je nach Fahrzeug und geografischem Gebiet unterschiedlich sein werden, erwartet FEV ein vielseitiges Angebot an Antrieben, unter denen sich verschiedene Formen der Hybridisierung, batteriebetriebene Elektrofahrzeuge und auch Brennstoffzellenfahrzeuge entwickeln werden. Dieses Angebot wird sich auf die Anforderungen an die verschiedenen Batterien auswirken, da jedes Fahrzeug mit mindestens einem elektrischen Energiespeichersystem mit niedriger und/oder hoher Spannung ausgestattet sein wird, das unterschiedliche technische Anforderungen stellt.

Von einer Niederspannungsbatterie (z. B. 12-V-Batterie für Anlasser, Licht und Zündung oder 48-V-Batterie für ein Mild-Hybrid-Fahrzeug) bis hin zu einem Hochspannungssystem (nicht extern aufladbares Hybridfahrzeug (HEV), Plug-in-Hybridfahrzeug (PHEV), batterieelektrisches Fahrzeug (BEV) oder Brennstoffzellenfahrzeug (FCEV)) unterscheiden sich die Anforderungen an die Batterie aufgrund der unterschiedlichen Nutzung des Fahrzeugs. Dies gilt sowohl in Bezug auf die Auslegungsziele (z. B. Leistung, Kapazität, Verpackung usw.) als auch hinsichtlich weiterer Aspekte



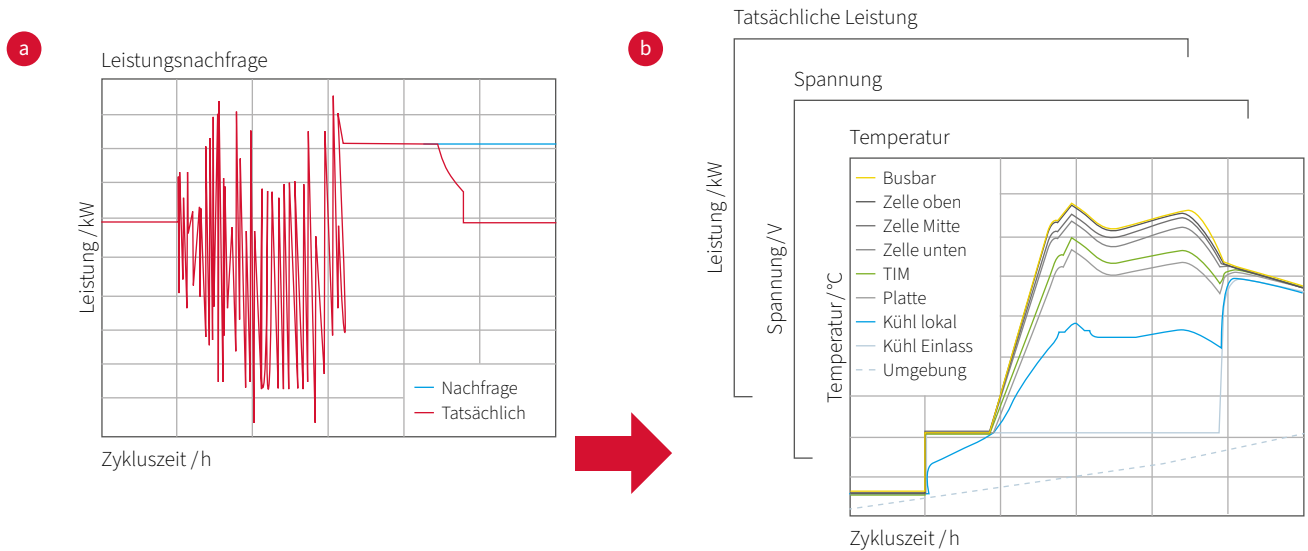
(z. B. Batteriemangementssystem BMS, Integration usw.). Diese Unterschiede wiederum führen zu neuen Entwicklungsherausforderungen, die sich in gleichem Maße unterscheiden. Wenn beispielsweise die Verwendung von Blei verboten wird, müssen 12-V-Batterien fortan auf einer anderen Technologie basieren, wobei die gleichen Betriebsleistungen bei begrenzten Kosten beibehalten werden müssen. Andererseits müssen Hochspannungsbatterien kontinuierlich höhere Leistungs- und Energiedichten bieten, um den gestiegenen Erwartungen an die Nutzung und Leistung gerecht zu werden und die Marktdurchdringung von BEV zu ermöglichen.

Im Folgenden werden Aktivitäten von FEV vorgestellt, die darauf abzielen, dass die zu entwickelnden Batteriesysteme in den unterschiedlichen Anwendungsbereichen ihre individuellen Anforderungen zuverlässig erfüllen.

LV – 48-V-Batteriemarkt und Besonderheiten bei 12-V-Anwendungen

Insbesondere für Mild-Hybrid-Fahrzeuge ist in den nächsten Jahren ein deutliches Wachstum zu erwarten. Das Spannungsniveau bleibt unter 60 V, wodurch die Kosten aufgrund der geringeren Auflagen im Vergleich zu höheren Spannungsniveaus begrenzt werden können. Dennoch ist die Leistung begrenzt, und 48-V-Systeme erlauben maximal

30 kW in der Spitze für einen begrenzten voll elektrischen Antrieb in bestimmten Konfigurationen. Trotz der Einführung von 48 V vor ca. fünf Jahren steigen die Anforderungen an die elektrische Leistung weiter an. Die neuen gebotenen Möglichkeiten veranlassen die OEMs, immer mehr Hilfsaggregate in das 48-V-System einzubauen. U. a. durch die notwendige Verfügbarkeit von Komponenten unter Key-off-Bedingungen steigen die Anforderungen an die 48-V-Batterie. Darüber hinaus wird die erwartete Verschärfung der Schadstoffemissionsnormen (wie beispielsweise bei der Euro 7-Norm) zum Einbau von elektrischen Komponenten mit hoher Leistung (z. B. elektrisch beheizte Katalysatoren) führen, deren Betrieb vollständig von der 48-V-Batterie abhängt, die dadurch an ihre Grenzen stoßen.



① Schematische Darstellung der Lebensdauerabschätzung. Die angeforderte Batterieleistung (a) wird als Anfangseingabe verwendet. Ein elektrothermisches Modell berechnet die tatsächlichen Zelllasten (b)

Im Anwendungsbereich der 12-V-Systeme ergeben sich erhebliche Unterschiede zu den übrigen Feldern, da im Allgemeinen keine verteilte, sondern eine vollständig integrierte Architektur angestrebt wird, die idealerweise auf einer Platine untergebracht ist. Die BMS-Komponenten werden typischerweise aus dem eigenen Zellverbund versorgt und benötigen daher eine Eigenstrommessung. Da die Standby-Verbraucher ständig versorgt werden müssen, sind die Schütze auch im Ruhezustand ständig geschlossen. Die große Spannweite der auftretenden Ströme, bis hin zu hohen C-Raten beim Motorstart, stellt eine Herausforderung für die Messgenauigkeit dar. Wird eine Versorgung für (teil-)autonomes Fahren gewünscht, ergeben sich Anforderungen an die funktionale Sicherheit und die Batterie muss gemäß ISO 26262 für eine zuverlässige Stromversorgung abgesichert werden. Durch die direkte Konkurrenz zur Blei-Säure-Batterie inklusive intelligentem Batteriesensor ist der Kostendruck sehr hoch, allerdings muss die BMS-Hardware auch deutlich geringere Anforderungen an die Isolation erfüllen.

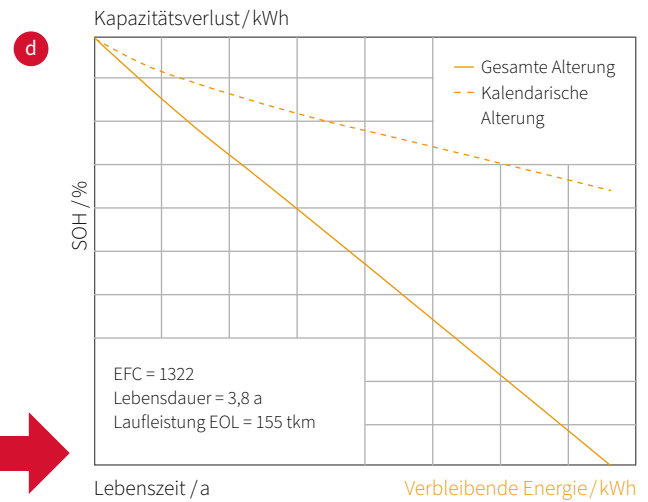
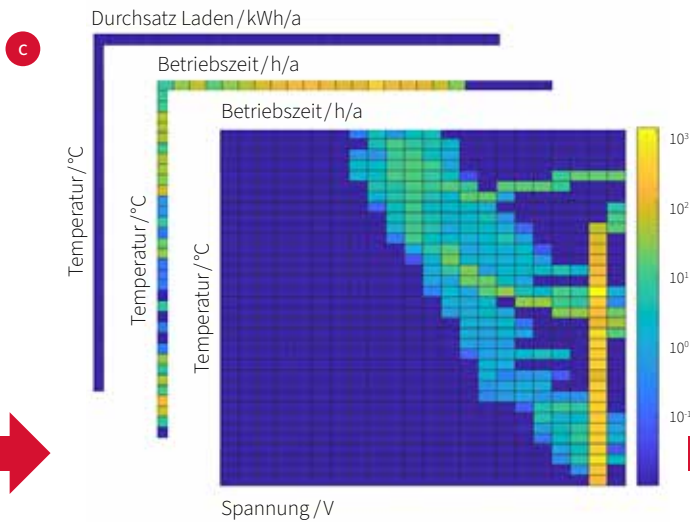
Lebensdauersimulation für HEV/PHEV zur Unterstützung von Systemauslegung und Design

PHEV- und auch HEV-Batteriesysteme müssen bei einer viel kleineren Batteriekapazität ähnliche Leistungsanforderungen erfüllen wie BEV-Systeme. Diese hohen Leistungsanforderungen spiegeln sich in der Notwendigkeit von Zellen wider, die sowohl kurzzeitigen Leistungsspitzen als auch hohen Zyklusraten standhalten können. Basierend auf umfangreichen Fahrzeugsimulationen müssen entscheidende Parameter wie der nutzbare Energieinhalt und Energiedurchsatz über die Lebensdauer abgeleitet werden, um eine geeignete Batteriezelle zu identifizieren. Diese hohen C-Raten verursachen hohe Leistungsverluste in den Batteriezellen und entsprechend hohe Wärmeeinträge, was zu Herausforderungen für das Kühlsystem führt und die Durchführung von Lebensdauersimulationen erforderlich macht.

Neben dem Energie- und Leistungsbedarf ist die angestrebte Lebensdauer ein entscheidender Faktor bei der Batterieentwicklung, die sich auf der Gesamt-

laufleistung bis zum Erreichen einer minimalen Restkapazität bezieht. In diesem Zusammenhang muss die Gesamtnutzung des Fahrzeugs berücksichtigt werden. Entsprechende Szenarien decken idealerweise ganze Tage mit unterschiedlichen Einsatzfällen des Fahrzeugs einschließlich Standzeiten ab. Auf diese Weise kann die sensible Abhängigkeit der zyklischen und kalendarischen Alterung von Zelltemperatur, Spannung, Lade- und Entladeströmen sowie SoC und DoD berücksichtigt werden. Für Alterungsberechnungen wurde bei FEV ein Tool entwickelt, das eine schnelle Abschätzung der Batterie-lebensdauer ermöglicht (siehe Abbildung 1). Ausgehend vom Leistungsbedarf und der verfügbaren Ladeleistung (Abbildung 1, a) werden die Zellzustände und Belastungen über ein elektrisch-thermisches Modell berechnet, hier beispielhaft für die Temperaturentwicklung während eines angepassten WLTP- und Ladezyklus (Abbildung 1, b). Für jedes Szenario und jeden Alterungszustand resultieren unterschiedliche Histogramme der wichtigsten Alterungsparameter (Abbildung 1, c), die wiederum zu einer aktuellen Alterungsrate führen. Über die Zeit integriert, ergeben diese Raten die erwartete Lebensdauer (Abbildung 1, d).



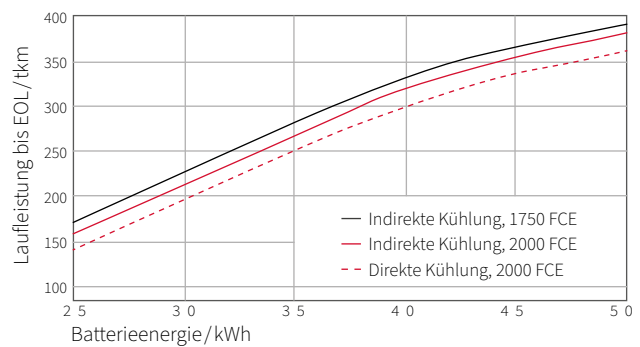


bei jedem SoH-Schritt. Diese Belastungen werden durch das Alterungsmodell (c) analysiert, um die aktuelle Alterungsrate abzuleiten und die erwartete Batterie-Lebensdauer (d) zu berechnen.

In einem exemplarischen Fall wird die Frage behandelt, ob ein PHEV-Batteriepack mit hoher Reichweite mit NMC-811-Zellen realisiert werden kann. Dazu wird die zu erwartende Lebensdauer in Abhängigkeit vom BOL-Energiegehalt berechnet (Abbildung 2). Zunächst werden NMC-Zellen (Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxide) mit einer ungefähren Zyklenfestigkeit von 2.000 FCE (Full cycle equivalents, vollständige Zyklusäquivalente) bei Referenzbedingungen untersucht. Es wird eine indirekte Kühlung über eine Bodenkühlplatte angenommen (durchgezogene rote Linie). Wie erwartet, steigt die Lebensdauer mit zunehmender Batteriekapazität aufgrund der geringeren elektrischen und thermischen Belastung. Zu höheren Energieinhalten hin flacht die Kurve ab, was auf die zunehmende Bedeutung der kalendarischen Alterung im Stillstand hinweist. Eine Laufleistung von 250 tkm wird bei ca. 33,1 kWh erreicht, was aus technischen Gründen auf eine Zielenergie von 34,6 kWh hindeutet.

Trotz der vielversprechenden Ergebnisse legen die extremeren Anwendungsfälle den Einsatz fortschrittlicher Kühltechniken nahe, um ein thermisches Derating zu vermeiden. Daher wird ein thermisches Design mit Immersionskühlung untersucht (durchgezogene schwarze Linie). Auch hier wird eine Zyklenstabilität von 2.000 FCE angenommen. Beim Vergleich beider Kühlungsansätze wird die begrenzte Auswirkung auf die Batterie-Lebensdauer deutlich: Der Vorteil beläuft sich auf nur 10 tkm Laufleistung bis zum Erreichen von 80 Prozent SOH.

Folglich kann eine PHEV-Batterie mit den ausgewählten NMC-Zellen und indirekter Kühlung realisiert werden. Die angestrebte Lebensdauer von 250 tkm wird mit einer Kapazität von 34,6 kWh erreicht.

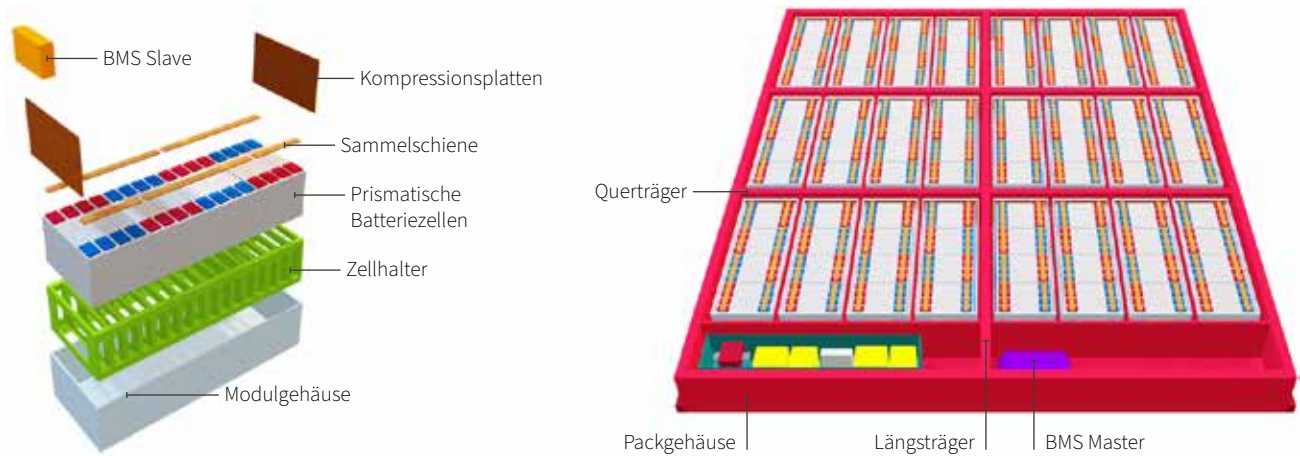


2) Erwartete Lebensdauer (Laufleistung bis EOL) einer PHEV-Batterie mit NMC-Zellen in Abhängigkeit von der Batteriegröße bei unterschiedlichen Kühlungsansätzen

Konzeptstudie zum hochintegrierten BEV-Batterie-Packaging

Da für rein batterieelektrische Fahrzeuge eine hohe Energiedichte auf Systemebene besonders wichtig ist um hohe Reichweiten zu erzielen, sind neben der Energiedichte der Zellen auch hochintegrierte Designansätze wie Cell-to-Pack entscheidend. Um die geometrischen Potenziale von Designansätzen mit unterschiedlichen Integrationsgraden zu untersuchen, wurden Batteriekonzepte erstellt und mit dem FEV-Batteriekonzept-Tool bewertet. Dabei werden verschiedene Designparameter für Wandstärken, Luftspalte und Bauteilmaße berücksichtigt und entsprechend langjährigen Erfahrungen konfiguriert, um realisierbare Batteriekonzepte zu gewährleisten. Der Schwerpunkt liegt dabei auf dem Vergleich zwischen Batteriesystemen auf Basis von NMC-Zellen mit LFP-Zellen (Lithium Eisenphosphat). Ein konventionelles modulares Batteriekonzept basiert auf Untereinheiten mit einer bestimmten Anzahl von Zellen, die dann





③ Dreibimensionale Grafik des Batteriemoduls in Explosionsdarstellung und des Batteriesystemkonzepts

zu einem Pack zusammengefügt und verschaltet werden. Um die Energiedichte des Batteriesystems weiter zu erhöhen, zielen Cell-to-Pack-Ansätze darauf ab, den Zwischenschritt der Module zu überspringen und Batteriezellen direkt in ein Pack zu integrieren.

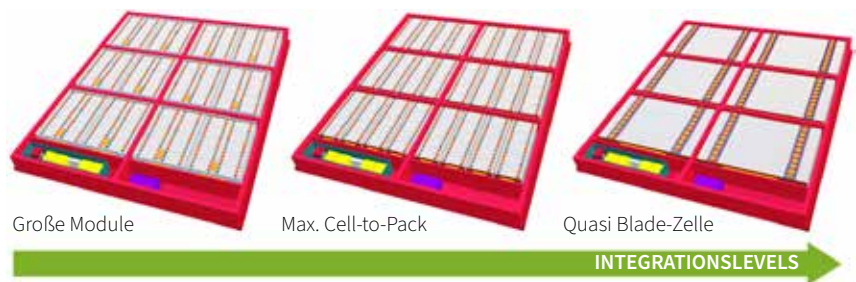
Das Grundkonzept stellt eine 400 V BEV-Batterie mit 70 kWh Energie aus der FEV Entwicklung dar. Die Batterie enthält prismatische CATL 50Ah-Zellen im Standard VDA PHEV2-Format mit NMC-Kathode, die dem Stand der Technik entsprechen und die in 4P96S verschaltet sowie in 24 Module unterteilt sind. Um eine hohe Struktursteifigkeit in den Fahrzeugrahmen einzubringen und eine ausreichende Sicherheit im Falle eines Seitenaufpralls zu gewährleisten, verfügt das Pack über ein robustes Gehäuse sowie zusätzlich über einen Längs- und zwei Querträger. Die notwendigen E/E-Komponenten wie u.a. Schütze, Sicherungen und Shunts sind im vorderen Bereich der Batterie untergebracht. Gleiches gilt für den BMS-Master. Zur Vermeidung von Thermal Propagation (TP) werden zwischen den Batteriemodulen Abschirmbleche angebracht. Abbildung 3 zeigt die im Tool modellierten Batteriekomponenten und rechts das Grundkonzept im konventionellen Module-to-Pack-Design. Um die Energiedichten auf verschiedenen Integrationslevels zu bewerten, wird zum Vergleich ein Pack mit identischen Außenmaßen und gleichem Layout in Bezug auf

Zellgeometrie, Modulanordnung, Gehäuse, Quer- und Längsträger etc. aus Zellen mit LFP-Kathode entworfen. Auf Modulebene erfolgt nun eine 3P5S-Verschaltung, um die geringere Nennspannung der LFP-Zellen für das Modul bestmöglich zu kompensieren und dennoch mit insgesamt 15 Zellen nahe am ursprünglichen Konzept mit der Zellanzahl 16 zu bleiben. Als Referenz dient eine prismatische CATL LFP 110Ah-Zelle, deren Kapazität auf ein maßgeschneidertes Zellformat umskaliert wird, um die exakten Außenmaße des Batteriepacks mit NMC-Zellen zu erzielen, was zu einer Kapazität von 49,07 Ah führt. Der Proportionalitätsfaktor ist hier das Volumen des Elektrodenstapels. Aufgrund der geringeren Energiedichte der Zellen resultiert daraus eine Gesamtenergie des Packs von 56,5 kWh.

Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass die LFP-Zelle ein intrinsisch höheres Sicherheitsniveau bietet als die NMC-Zelle, da sie keinen Sauerstoff an der Kathode aufweist. Studien zeigen, dass LFP-Zellen

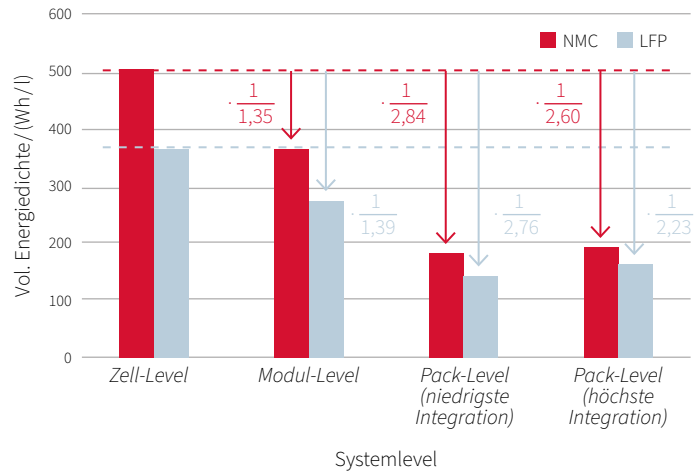
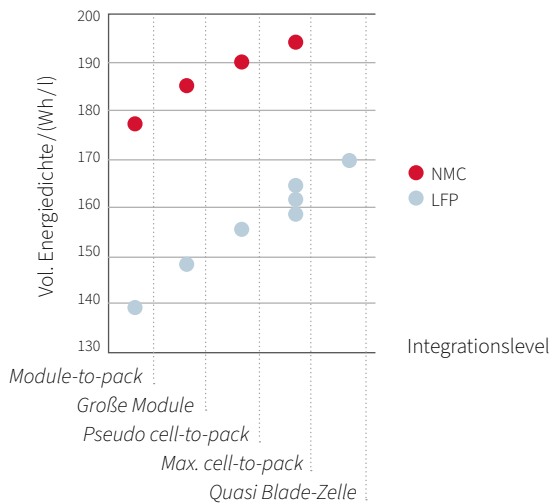
eine geringere Neigung zu TR zeigen und selbst im Falle eines thermischen Events nur bei etwa 400 °C brennen, verglichen mit etwa 1.000 °C bei NMC-Zellen. Außerdem entwickeln sie ein etwa um den Faktor Fünf geringeres Venting-Volumen. Darüber hinaus ist aufgrund der geringeren Energiedichte der LFP-Zellen weniger Energie in das Gesamtsystem eingebracht. Ausgehend von diesen Annahmen wird in den folgenden Konzepten mit LFP-Zellen ein dichteres Packaging als im jeweils analogen NMC-Konzept umgesetzt.

Auf dem Weg zu einem höher integrierten Packdesign werden die Designparameter schrittweise angepasst oder Komponenten weggelassen. Generell sind verschiedene Strategien und Kombinationen von Maßnahmen für Cell-to-Pack-Designs möglich. In dieser Studie werden die Gehäuse und die Querträger unverändert beibehalten, da die Struktursteifigkeit ein wesentliches Kriterium darstellt und unabhängig von der verwendeten Zellchemie ist. Der realisierbare Umsetzungsgrad für



④ Konzept-Layout-Visualisierungen von Entwürfen in steigenden Integrationslevels





⑤ Energiedichte in verschiedenen Integrationslevels und auf verschiedenen Systemebenen im Vergleich

eine bestimmte Anwendung hängt stark von deren Anforderungen und den Randbedingungen für die Fahrzeugintegration ab.

Große Module: Im ersten Anpassungsschritt wird die Anzahl der Zellen pro Modul verdoppelt und die Anzahl der Module entsprechend halbiert. Durch weniger Lücken zwischen den Modulen und das reduzierte Modulgehäusematerial wird eine etwas höhere Packungsdichte erreicht.

Pseudo Cell-to-Pack: Die Modulgehäuse entfallen, es bleibt aber eine Unterteilung in Zellverbände entsprechend der ursprünglichen Module.

Max. Cell-to-Pack: Bei der NMC-Batterie wird der Abstand zwischen den Zellverbänden verringert, was noch einige konstruktive Maßnahmen gegen TP zwischen den Zellverbänden ermöglicht. Für die LFP-Zelle wird eine schrittweise Studie für die Abstände zwischen den Zellen durchgeführt, um die geometrischen Potenziale und die Sensitivität der Parameter unter der Annahme einer Zelle mit einer extrem niedrigen TR-Tendenz zu untersuchen.

Quasi Blade-Zelle: Schließlich wird eine LFP-Batterie mit denselben Außenabmessungen mit einer neu skalierten, extrem großen Zelle in 1P-Verschaltung entworfen. Die Zelle erstreckt sich über fast die Hälfte der Batteriebreite und ist angelehnt an die von BYD entwickelten LFP-Blade-Zellen. Einige LFP-Konzept-Layouts der verschiedenen Integrationslevel sind in Abbildung 4 zu sehen.

Die Studie zeigt, dass die Energiedichte der NMC-Batterie durch Erhöhung des Integrationsgrades von 177,4 Wh/l im Basisdesign auf bis zu 194,2 Wh/l gesteigert werden kann. In ähnlicher Weise steigt die Energiedichte der LFP-Batterie von anfänglich 139,3 Wh/l auf bis zu 164,4 Wh/l und sogar 169,2 Wh/l bei der Verwendung von sehr großen Zellen. Bemerkenswert ist, dass die Energiedichte des NMC-Beispiels auf Zellebene mit 504,6 Wh/l um den Faktor 1,36 über der LFP-Zelle mit 371,4 Wh/l liegt,

auf Packebene im hochintegrierten Design aber nur der Faktor 1,15 dazwischen liegt. Diese höhere Packungsdichte wird durch den Volumenfaktor zwischen dem Gesamtsystemvolumen und dem reinen Zellvolumen einer Batterie ausgedrückt. Abbildung 5 fasst die resultierenden Energiedichten der NMC- und LFP-Batterien von der Zell- bis zur Systemebene für die verschiedenen Integrationslevel zusammen und gibt auch die Volumenfaktoren der Packungsdichte an.

Von

Florian Pampel · pampel_f@tme.rwth-aachen.de
 Dr. Martin Hüske · hueske@fev.com
 Igor Hazanavicius · hazanavicius@fev.com
 Dr. Michael Stapelbroek · stapelbroek@fev.com

Die Erstveröffentlichung der Inhalte dieses Artikels erfolgte beim diesjährigen Internationalen Wiener Motorensymposium.

Die Studie bestätigt das geometrische Potenzial, dass eine LFP-Batterie – unter der Annahme eines sehr hohen Sicherheitsniveaus der Zellen – deutlich näher an der Energiedichte eines NMC-Systems liegen kann. Anders als es der Unterschied auf Zellebene zunächst suggeriert, macht ein dichteres Packaging auf Pack-Ebene dies möglich. Dennoch ist es wichtig zu betonen, dass das dichteste maximale Cell-to-Pack-Integrationsniveau insbesondere für LFP als theoretisches Maximum zu betrachten ist. Auch die sehr großen Quasi-Blade-Zellen werden ihre Reife und Zuverlässigkeit über einen langen Zeitraum unter Beweis stellen müssen.



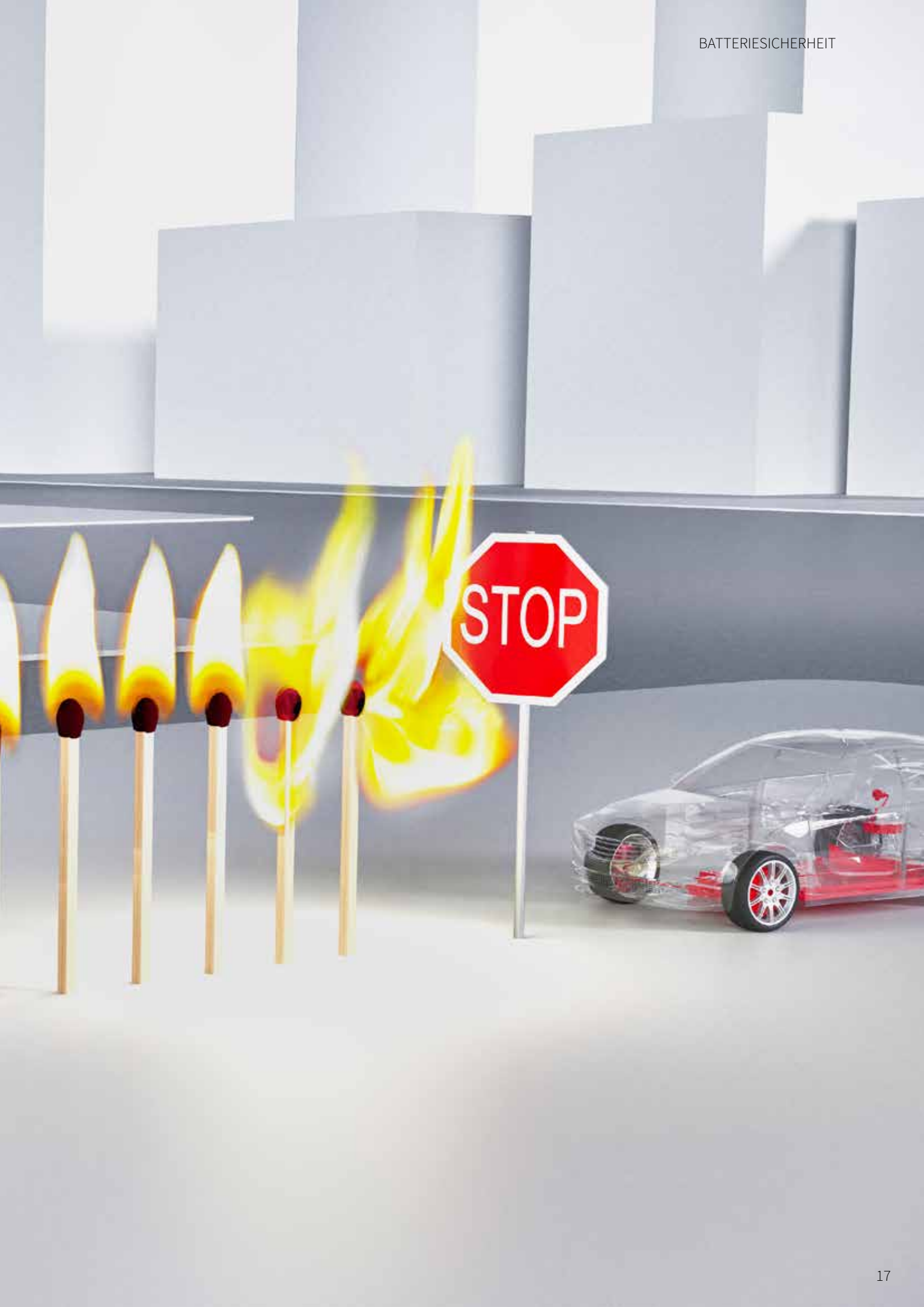
BATTERIESICHERHEIT

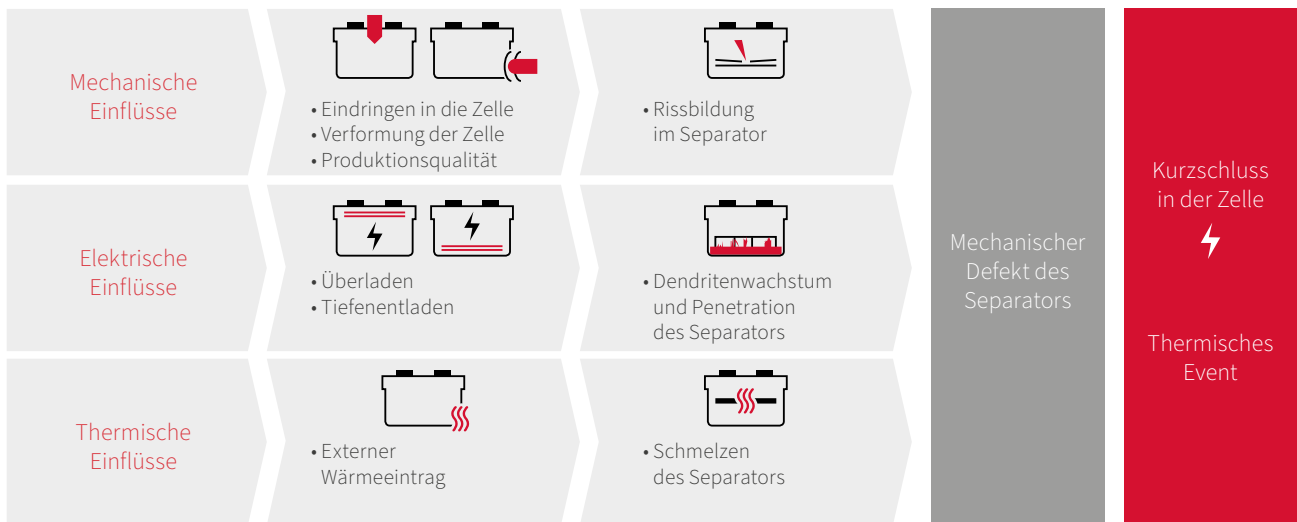
NO PROPAGATION – SICHERHEITZIEL FÜR PREMIUM-BATTERIESYSTEME

Batteriesysteme für Fahrzeuge mit elektrifizierten Antriebssträngen müssen immer höhere Energiedichten bei gleichzeitig maximaler Sicherheit und sinkenden Kosten erreichen, um dem Kunden höchste Reichweiten zu bezahlbaren Preisen anbieten zu können. Höhere Energiedichten auf Systemebene werden durch neue Batteriezellen und höhere Packungsdichten mit z. B. „Cell-to-Pack“ oder „Cell-to-Chassis“ Ansätzen erreicht. Dabei führen höhere Energiedichten auch zu deutlich reaktiveren Zellchemien sowie größeren Zellformaten. Damit steigt die Gefahr, dass durch Produktionsfehler in der Zelle oder durch Betriebsstörungen Batteriebrände entstehen. Die Heftigkeit eines sogenannten „Thermal Runaway“ nimmt mit steigender Reaktivität der Zelle zu. Gleichzeitig steigen die Anforderungen an die passive Sicherheit bis hin zum „Stop Propagation“ oder sogar „No Propagation“ kontinuierlich. Um diese Ziele zu erreichen, ist eine enge Integration von Entwicklung und Versuch erforderlich.

Zu diesem Thema hat FEV multiphysikalische und fluiddynamische Modelle entwickelt und kombiniert, die dazu beitragen, die Entwicklungszeit von Lithium-Ionen-Batteriesystemen zu reduzieren und ein sicheres System möglichst früh im Prozess zu definieren. Initiale Zelltests generieren dabei die notwendigen Eingangsdaten für die Simulationsmodelle. Anschließend können verschiedene Maßnahmen zur Optimierung des thermischen Ausbreitungsverhaltens virtuell getestet werden. Durch kaskadierte Versuchsreihen mit unterschiedlichen Zellen, Materialien sowie Entlüftungssystemen und auf Zellebene, im Zellverbund, im Modul, im Modulverbund sowie im Gesamtsystem kann die Genauigkeit der Modelle weiter optimiert werden. Mit dem gewählten Ansatz wird die Validierung des „Thermal Propagation“-Homologationstests zum frühestmöglichen Zeitpunkt der Entwicklung sichergestellt. Somit konnte ein wirkungsvolles Lösungskonzept zum Thema „Stop Propagation“ entwickelt werden.







① Auslösemechanismen des „Thermal Runaway“

„Thermal Runaway“ und „Thermal Propagation“

„Thermal Runaway“ (TR) ist die schwerwiegendste Fehlerart bei Lithium-Ionen-Batterien (LIBs). Der TR beschreibt eine sich selbst beschleunigende exotherme Kettenreaktion innerhalb der Zelle, die zu hohen Temperaturen, Explosion, Feuer und der Freisetzung von giftigen und brennbaren Gasen und Partikeln führen kann, und somit eine ernsthafte Gefahr für die Fahrzeuginsassen darstellt. TR kann durch verschiedene Mechanismen ausgelöst werden, die in Abbildung 1 dargestellt sind.

Ohne ausreichende Gegenmaßnahmen wird die Wärme der Event-Zelle auf die benachbarten Zellen eines Batteriemoduls oder Batteriepacks übertragen, die ihrerseits in einen TR übergehen können. Dieser Vorgang wird als „Thermal Propagation“ (TP) bezeichnet.

Konstruktive Maßnahmen in Richtung „No Propagation“

FEV setzt eine Vielzahl von konstruktiven Maßnahmen ein, um die Sicherheit von Batteriepacks zu erhöhen und TP zu stoppen. Diese Maßnahmen lassen sich nach ihrer Wirkungsweise in verschiedene Kategorien einteilen.

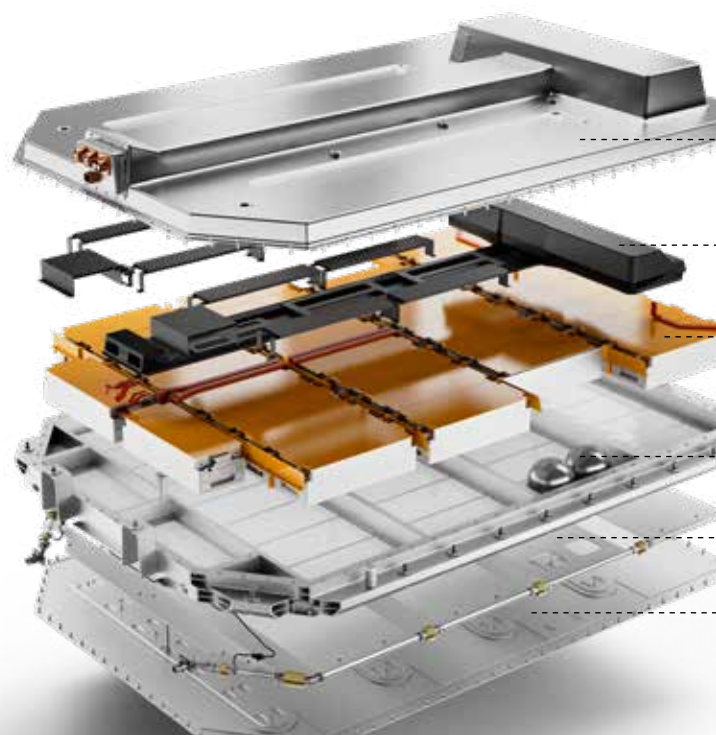
Die Verwendung von Wärmebarrieren ist eine bewährte Methode, um die Wärmeleitung zwischen Zellen zu reduzieren. Üblicherweise werden spezielle thermische Isolationsmaterialien verwendet, die die Anforderungen an eine niedrige Wärmeleitfähigkeit, Temperaturbeständigkeit und mechanische Flexibilität erfüllen.

Das Batteriepack muss mit redundanten Entlüftungsventilen ausgelegt werden, um das Abgas der Event-Zelle zuverlässig aus dem System abzuführen und einen signifikanten Überdruck zu vermeiden. Kurze Wege von den Event-Zellen zu den Ventilen

minimieren die Wärmebelastung für andere Komponenten des Packs. Zur Sicherheit der Passagiere muss eine Entzündung des Gas-Luft-Gemisches außerhalb des Batteriegehäuses verhindert werden. Deshalb müssen glimmende Partikel im Abgas ab einer bestimmten Größe herausgefiltert werden. Das entsprechende Filtersystem, z. B. ein Metallgewebe, muss in der Lage sein, hohe Abgastemperaturen von über 1.000 °C sowie große Mengen an Partikeln in kurzer Zeit zurückzuhalten, ohne seine Filterfunktion zu verlieren oder zu verstopfen.

Abbildung 2 zeigt ein Batteriepack mit Designmerkmalen zur Vermeidung von TP. Mica-Platten werden zur thermischen und elektrischen Isolierung der Module und anderer kritischer Komponenten verwendet. Überdruckventile dienen dem Druckausgleich bei Normalbetrieb und bei einem TR-Event. Die Metallgewebefilter sind halbkugelförmig ausgeführt, damit Partikel heruntergleiten können.

② Explosionszeichnung eines Batteriepacks mit Designmerkmalen zur Vermeidung von TP



Das Potenzial der Lichtbogenbildung wird durch die Verringerung der Spannungsunterschiede und die Vergrößerung der Abstände zwischen Komponenten mit unterschiedlichen Potenzialen minimiert. Dies kann durch die Auslegung der Modulbusbars als Schmelzsicherung und die Verwendung von Busbar-Terminalabdeckungen und temperaturbeständiger Isolierung der Busbars erreicht werden.

Die Verwendung des Batteriekühlsystems während der TP-Homologation ist nicht ausdrücklich verboten. Abgesehen von der Gefahr eines Kühlsystemausfalls bei einem realen Fahrzeugcrash kann eine optimierte Kühlstrategie im TP-Fall eine signifikante Menge an Wärme aus dem Batteriepack abführen und damit die Propagation abschwächen. Um die Funktionsfähigkeit des Kühlsystems in diesem Fall zu gewährleisten, muss es angemessen vor mechanischen Einflüssen geschützt werden und benötigt eine separate Energiequelle für die Kühlmittelpumpe.

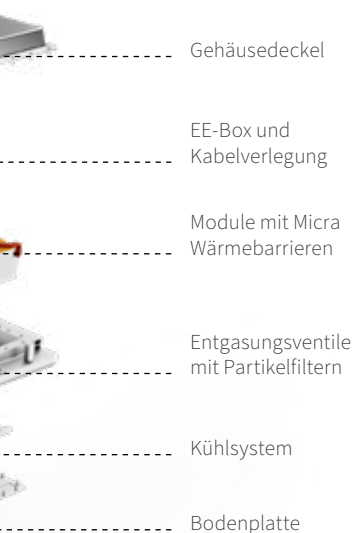
„Thermal-Propagation“-Versuche

Das Testen spielt in jeder Entwicklungsphase von Batteriesystemen eine wichtige Rolle. Am eDLP von FEV wird ein kaskadierter Prüfprozess zur TR- und TP-Reduzierung erfolgreich eingesetzt. Diese Methode liefert die notwendigen Messergebnisse für die Parametrisierung, Anpassung und Validierung der Simulationsmodelle. Abbildung 3 zeigt das kaskadierte Prüfkonzept von der Einzelzelle bis zum kompletten Pack.

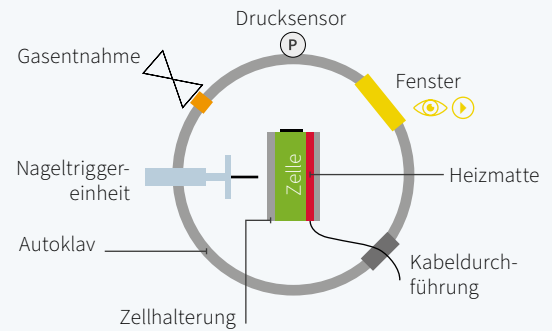
Zur Charakterisierung der zellspezifischen TR-Eigenschaften sind Einzelzellentests erforderlich. Diese Tests werden normalerweise in einem (adiabatischen) Autoklaven durchgeführt. Der Prüfaufbau bietet eine kontrollierte Umgebung für die zu prüfende Zelle und ermöglicht die Messung relevanter Daten wie Menge und Zusammensetzung des Abgases oder die Starttemperatur des TR.

Zellverbundtests bieten die Möglichkeit, Zellzwischenmaterialien auf ihr Ausbreitungsverhalten zu untersuchen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Vermeidung einer thermischen Überlastung der benachbarten Zelle. Darüber hinaus können geometrische Lösungen zur Untersuchung von Brandschutzmaßnahmen genutzt werden.

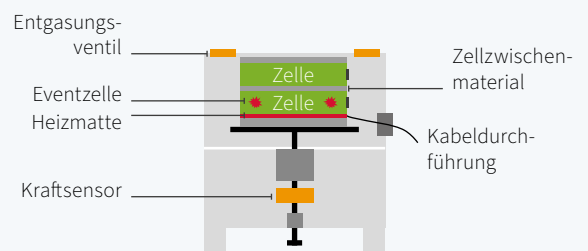
Mit Hilfe der Propagationsbox können verschiedene Kühlstrategien oder aktive Löschkonzepte für einzelne Module oder Modulgruppen zur Vermeidung von TP untersucht werden. Einer der größten Vorteile ist die variable Positionierung des TR-Auslösers und ausreichend Platz für die zusätzlich erforderliche Messtechnik.



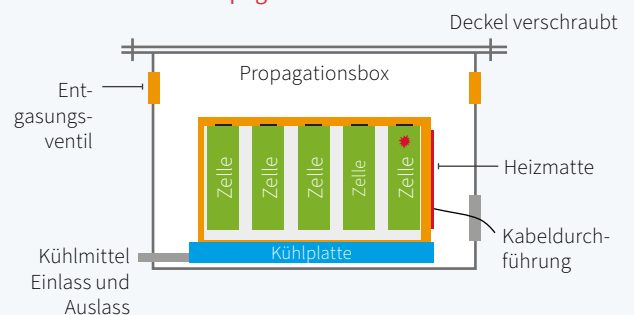
a. Zellversuch



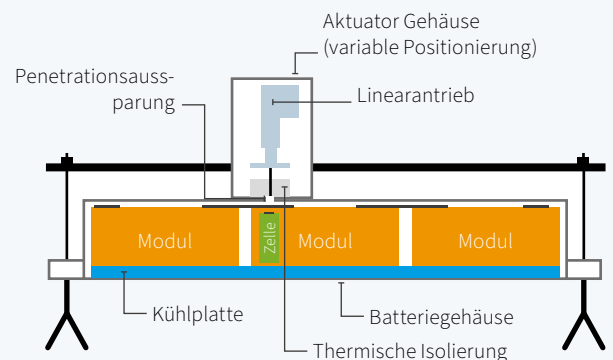
b. Zellverbundversuch



c. Modulversuch in Propagationsbox



d. Versuch des Hochvoltsystems



③ Schematische Darstellung des kaskadierten Prüfkonzepts von der Einzelzelle bis zum vollständigen Pack

Darüber hinaus bietet FEV die für die Homologation notwendigen Versuche für das gesamte Batteriesystem mit anschließender Demontage und detaillierter Analyse an. So können z. B. die erfolgreiche Trennung des Hochspannungskreises, der Zustand der Isolationsmaterialien und das Auftreten von Lichtbögen direkt bewertet werden.

Simulationsmethodik

Um Designentscheidungen zu unterstützen und den Testaufwand zu minimieren, hat FEV eine TR/TP-Simulationsmethodik entwickelt. Diese besteht aus zwei separaten numerischen Modellen. In COMSOL Multiphysics wurde ein detailliertes thermisches Modell und in StarCCM+ ein Computational Fluid Dynamics (CFD) Modell der Abgasströmung entwickelt.

Das multiphysikalische Modell kann die Wärmeentwicklung während des TR im Inneren der Zelle lokal und zeitabhängig auflösen. Es kann verschiedene Zell-Triggermethoden berücksichtigen und die Reaktionskinetik während des TR durch Arrhenius-Korrelationen modellieren. TP wird unter Berücksichtigung von Wärmeleitung und Wärmestrahlung in und zwischen Festkörpern mit detaillierten Materialeigenschaften simuliert. So ermöglicht das Modell die Auswertung der Temperaturverteilung und der Propagationszeiten von Zelle zu Zelle und von Modul zu Modul. Es können verschiedene Konstruktionsentscheidungen zur Verhinderung von TP untersucht werden. Abbildung 4a zeigt beispielhaft einen erfolgreichen TP-Stopp durch den Einsatz von thermischen Barrieren zwischen den Modulen.

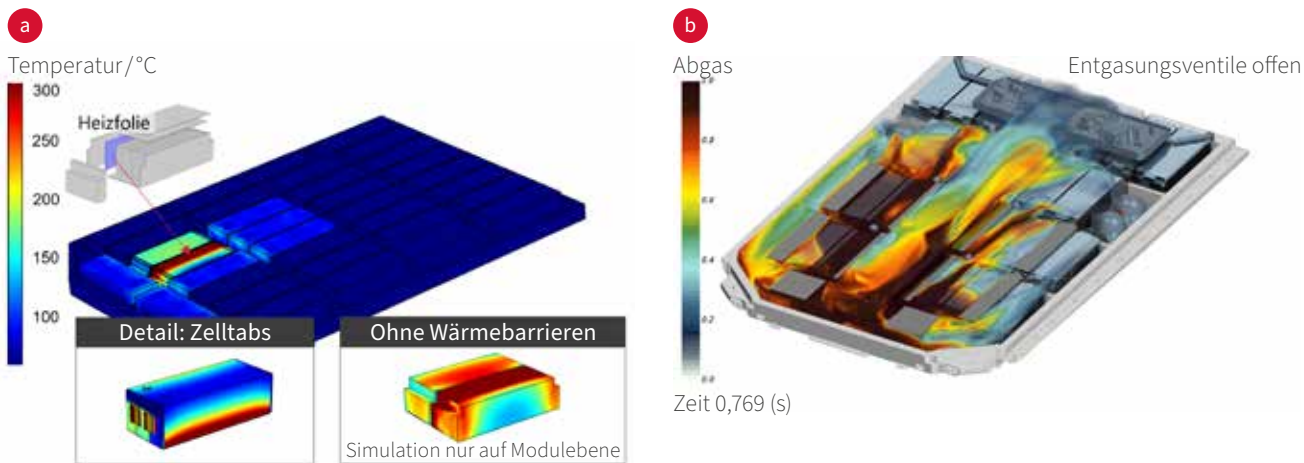
Das CFD-Modell gibt Einblicke in das Strömungsverhalten des Abgases von der getriggerten Zelle oder dem Modul zu den im Batteriegehäuse installierten Entgasungsventilen. Detaillierte Entgasungseigenschaften der Ventile werden berücksichtigt. So kann der zeitabhängige Überdruck im Inneren des Packs bewertet werden, der wiederum in Struktursimulationen des Batteriegehäuses genutzt werden kann. Darüber hinaus können

geeignete Entgasungspfade entwickelt werden, um das heiße Abgas schnell von kritischen Komponenten wegzuleiten. Der konvektive Wärmeübergang zu benachbarten Modulen und anderen temperaturkritischen Bauteilen wie z. B. Busbars kann simuliert und dann als zusätzliche Randbedingung im thermischen multiphysikalischen Modell verwendet werden. Ein Beispiel für die Verteilung der Abgase im Inneren eines Batteriepacks ist in Abbildung 4b dargestellt.

Die Kopplung des CFD-Modells mit einem Lagrangeschen Partikelmodell ermöglicht die Simulation des Transports von kleinen Aschepartikeln und anderem unverbranntem Zellmaterial, das aus der Eventzelle austritt. Die Anhäufung der Partikel in bestimmten Bereichen des Packs und die Wahrscheinlichkeit, dass Partikel mit hoher Energie das Pack durch die Entgasungsventile verlassen, können untersucht werden. Darüber hinaus kann eine qualitative Aussage über das abrasive Verhalten in kritischen Bereichen getroffen werden. Ein Beispiel für die durchmesserabhängige Partikelverteilung ist in Abbildung 5a dargestellt.

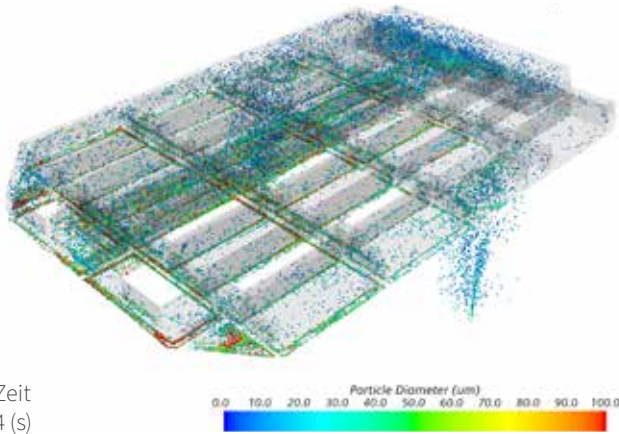
Mit Hilfe eines vereinfachten Verbrennungsansatzes können zusätzliche Schäden wie erhöhte Gehäuselasten durch erhöhten Druck und höhere thermische Lasten durch höhere Gastemperaturen berücksichtigt werden. Ein Beispiel für die Simulation der Flammenfront ist in Abbildung 5b dargestellt.

Mit der aktuellen Simulationsmethodik können viele Entwicklungsanforderungen erfüllt werden. Ein großes noch verbleibendes Risiko für das Scheitern von TP-Homologationstests ist jedoch die Bildung von Lichtbögen während TR und TP. Obwohl die Luft- und Kriechstrecken im Pack so ausgelegt sind, dass Lichtbögen im Normalbetrieb zuverlässig verhindert werden, ist das Lichtbogenverhalten während TR und TP praktisch unbekannt. Um dieses Problem zu lösen, wird Forschung zur Modellierung der Wahrscheinlichkeit der Lichtbogenbildung betrieben. Partikel im Abgasstrom und Ionen in der Flammenfront gelten als Haupteinflussfaktoren auf die Durchschlagsspannung

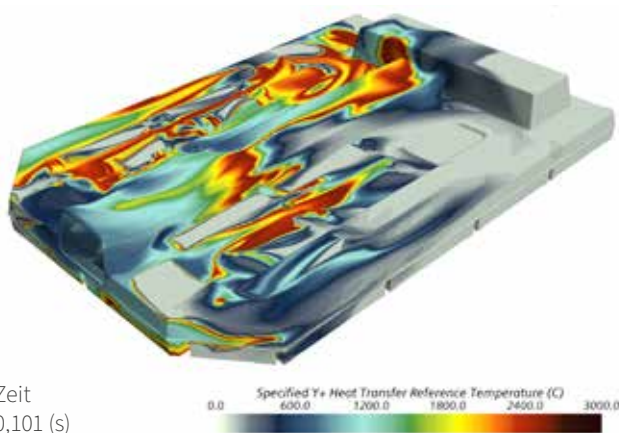


④ a: TR- und TP-Simulation in COMSOL Multiphysics: Auswirkung von Wärmebarrieren, b: CFD-Simulation in StarCCM+: Abgasverteilung

Ventile offen

Zeit
4 (s)

Ventile offen

Zeit
0,101 (s)

© a: Durchmesserabhängige Partikelverteilung in der Partikelströmungssimulation, b: Wandnahe Temperaturverteilung in der Flammenfront-Simulation

des Gases. Daher müssen die zuvor diskutierten Partikel- und Verbrennungs-Simulationsmethoden gekoppelt und weiter detailliert werden. Auf Grundlage von Experimenten werden bestehende Durchbruchspannungsformulierungen an die TR-Bedingungen im Batteriepack angepasst und in das Modell implementiert. Dies wird zu einem besseren physikalischen Verständnis der Lichtbogenbildung führen und es können geeignete Gegenmaßnahmen entwickelt werden.

Von

Felix Elsner · elsner@tme.rwth-aachen.de
Dr. Michael Stapelbroek · stapelbroek@fev.com
Rüdiger Beykirch · beykirch@fev.com

Die Erstveröffentlichung der Inhalte dieses Artikels erfolgte beim diesjährigen Internationalen Wiener Motorensymposium.

Zusammenfassung und Ausblick

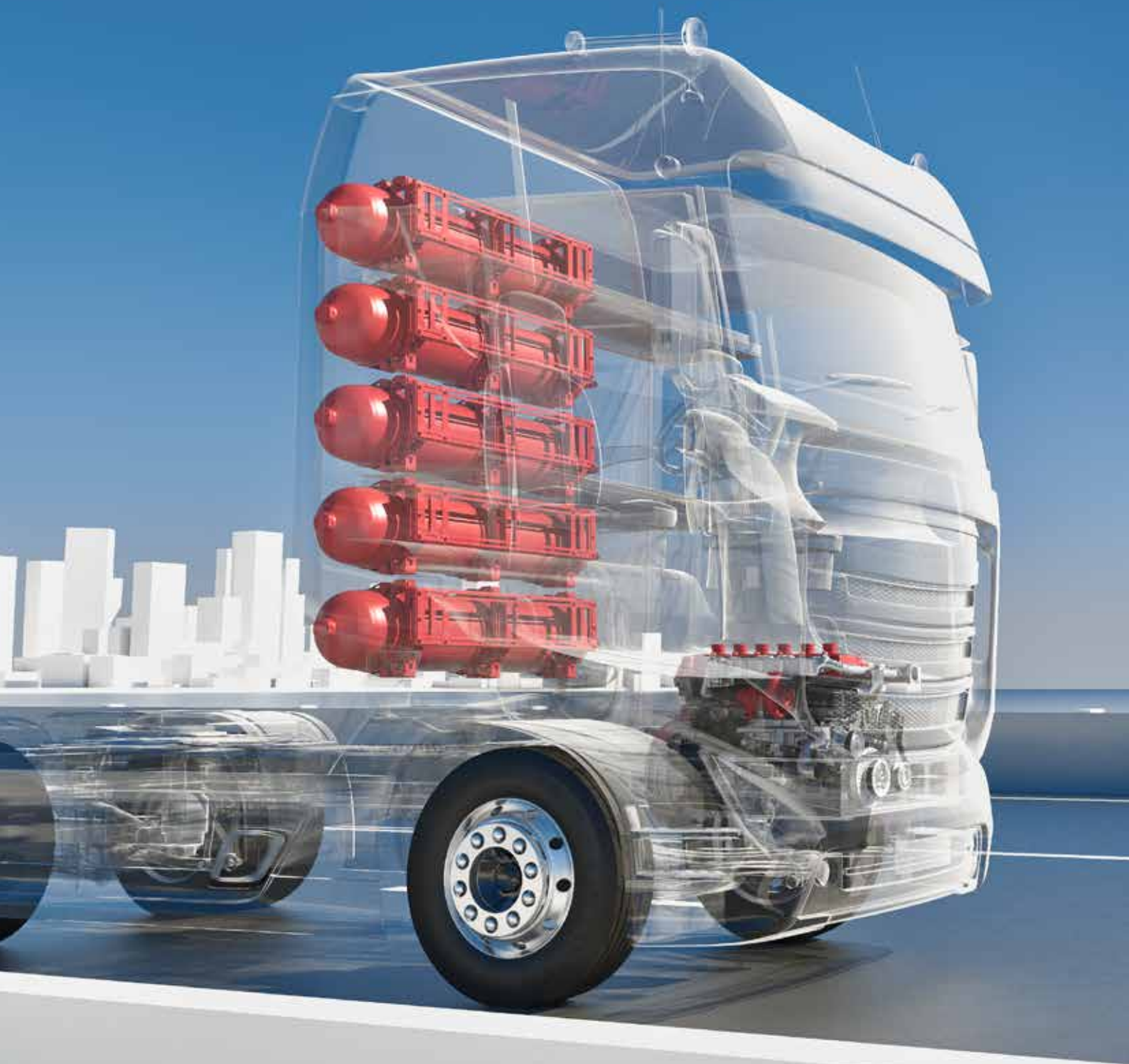
Die gesetzlichen Anforderungen an den Insassenschutz erhöhen den Entwicklungsaufwand zur Erreichung der TR/TP-Präventionsziele erheblich. Die vorgestellte Werkzeug- und Methodenkette berücksichtigt fortschrittliche Simulationsmethoden zum Nachweis des Potenzials von Konstruktionsmaßnahmen und ein kaskadiertes Prüfkonzept zur Parametrisierung und Verbesserung der Simulationsmodelle. Sie bietet daher erhebliche Vorteile bei der Batterieentwicklung sowie eine erhöhte Fahrzeugsicherheit im Kundeneinsatz.

Zur Eindämmung von TP und Erhöhung der Batteriesicherheit können eine Vielzahl von Designmaßnahmen eingesetzt werden. Dazu gehören der effektive Einsatz von thermischen Barrieren, dedizierte Entgasungspfade mit minimalem Einfluss auf kritische Komponenten, die Verwendung von redundanten Entgasungsventilen und Partikelfiltern, die Abschirmung von temperatur- oder lichtbogenkritischen Komponenten mit zusätzlicher Isolierung wie z. B. Mica-Platten und eine spezifische Kühlstrategie im TR-Fall.

Verbesserte kombinierte multiphysikalische und fluiddynamische Simulationsmodelle tragen dazu bei, Kosten zu senken und die Entwicklungszeit von TP-sicheren Batteriepacks zu verkürzen, indem sie den Testaufwand erheblich reduzieren. Darüber hinaus befinden sich wichtige Themen wie die Simulation der Lichtbogenbildung bei TR/TP derzeit in der Entwicklung und werden die Vorteile des virtuellen Versuchs weiter hervorheben.

H2 ICE

**ANTRIEBSSTRANGOPTIMIERUNG
BEIM H2-VERBRENNUNGSMOTOR**



Wasserstoff als Kraftstoff für Verbrennungsmotoren bietet aufgrund seiner Eigenschaften mehrere Möglichkeiten, das Verbrennungskonzept auszulegen. Die optimale Auslegung unterscheidet sich je nach Anwendung und hängt auch von der Verfügbarkeit der entsprechenden Technologien ab. Die gängigste Anwendung ist das Otto-Verbrennungsprinzip mit Fremdzündung. Dieses Konzept wird im Folgenden betrachtet.

Einblasesystem





Port fuel injection system (PFI)

Beim PFI wird Wasserstoff bei niedrigem Druck (~10 bar) in den Ansaugtrakt eingegast. Die lange Zeit für die Gemischaufbereitung und die am Einlassventil erzeugten Turbulenzen sorgen für eine sehr gute Homogenität des Gemischs. Fette Luft/Kraftstoff-Bereiche werden fast vollständig vermieden, was die NO_x-Bildung und die Klopfneigung reduziert. Andererseits verringert die externe Gemischbildung die Zylinderfüllung, da sowohl Frischluft als auch Wasserstoff in den Zylinder angesaugt

werden müssen. Bei einem typischen Lambda-Wert von 2 reduziert sich die Zylinderluftfüllung dadurch um ~20 Prozent. Daher steigt der Ladedruckbedarf zur Darstellung der gleichen Last bei gleichem Lambda im Vergleich zum DI Konzept um ca. 20 Prozent an.

Thermodynamische Untersuchungen wurden an einem 7,7-Liter-Motor durchgeführt, der für den H₂-Betrieb modifiziert wurde. Dank einer Aufrüstung des Aufladesystems (zweistufige anstelle der ursprünglichen einstufigen Aufladegruppe) und einer optimierten Kolbenkonstruktion wurden diesel- und erdgas-ähnliche effektive Mitteldruck-Werte von maximale 19,6 bar erreicht. Auch die erreichte Motorleistung (220 kW) ist die der verfügbaren Erdgas- und Dieselvariante.

Ein PFI-System ist mit geringem Aufwand in einen bestehenden Motor zu integrieren. Die Eingasventile sind bereits auf dem Markt erhältlich. Daher stellt eine PFI-Konfiguration eine attraktive Lösung für die Nachrüstung von Anwendungen mit geringerer Leistung dar. Darüber hinaus ist das Ausfallrisiko gering, da bewährte Technologie verwendet wird.

	Externe Zumischung	Platzbedarf Zylinderkopf		
	Niederdruck PFI	Niederdruck DI	Mitteldruck DI	Hochdruck DI
Kraftstoffeingasung	Saugrohreingasung ~ 5 – 10 bar	Direkteingasung ~ 15 – 30 bar	Direkteingasung ~ 40 – 60 bar	Direkteingasung ~ 300 bar
Spezifische Leistung (HD-) Motor	< 25 kW/l	> 25 kW/l	> 25 kW/l	~ 30 kW/l
BMEP-Spitzenwert (HD-) Motor	< 20 bar	> 20 bar	> 20 bar	> 25 bar
Verbrennung	 Stochiometrisch / Mager Fremd gezündet	 Mager Fremd gezündet	 Mager Fremd gezündet	 Mager Fremd gezündet / Diffusiv
Klopfneigung	↓	0	0	↑ (SI) -- nicht vorhanden (Dif. ¹)
Ladedruckbedarf	↑↑	0	0	0
Transientes Lastverhalten	↓↓	0	0	↑
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> · Leicht zu integrieren · Hardware verfügbar · Geringes Ausfallrisiko 	<ul style="list-style-type: none"> · robust gegen Backfire · Leistungsdichte · Transientes Ansprechverhalten 	<ul style="list-style-type: none"> · Gleiche wie Niederdruck-DI · kompakter als Niederdruck DI · potenziell bessere Gemischaufbereitung 	<ul style="list-style-type: none"> · Gleiche wie Mitteldruck-DI · Diffusive Verbrennung möglich
Entwicklungsschwerpunkt	<ul style="list-style-type: none"> · Ladedruck · Sicherheit (backfire) 	<ul style="list-style-type: none"> · Integration DI-Injektor · Homogene Gemischaufbereitung 	<ul style="list-style-type: none"> · Integration DI-Injektor · Reichweite 	<ul style="list-style-type: none"> · Integration DI-Injektor · Hochdruckerzeugung · Für diffusive Verbrennung hohe Nox-Rohemissionen

① Einspritzsysteme für Schwerlastmotoren -13l - mit einstufiger Turboaufladung

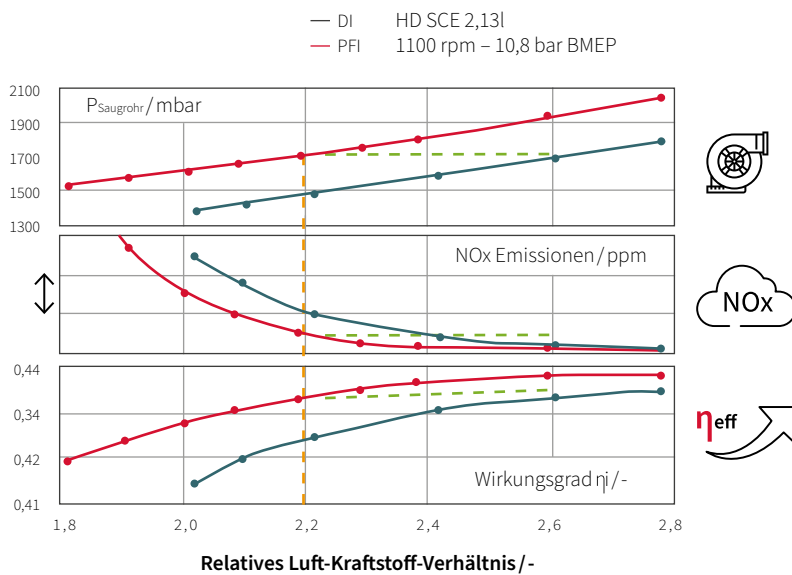
1: Diffusive Verbrennung

Allerdings birgt die externe Gemischbildung das Sicherheitsrisiko durch Rückzündungen. Eine Anpassung der Ventilsteuerzeiten zur Reduktion der Überschneidung und ein leicht verzögertes Eingasen nach dem Öffnen des Einlassventils zeigen hier einen positiven Effekt.

Direct injection system (DI)

Die Niederdruck-Direkteingassung (LP-DI) erfordert einen Eingasdruck von 15 bis 30 bar. Bei der Mitteldruck-Direkteingassung (MP-DI) wird der Kraftstoff mit 40 bis 60 bar eingegast, wodurch sich die Eingasdauer verkürzt. Durch den höheren Kraftstoffdruck ergibt sich ein möglicher Vorteil bei der Gemischbildung. Der höhere Massenstrom bei gleicher Geometrie ermöglicht es kleinere Mitteldruckinjektoren einzusetzen, was Vorteile bei Packaging bedeuten kann.

PFI und DI in Abhängigkeit vom relativen Luft/Kraftstoff-Verhältnis Die in Abbildung 2 dargestellten Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen wurden an einem HD-Einzylindermotor durchgeführt. Bei einem Vergleich mit konstantem BMEP und konstantem Lambda hat die DI-Konfiguration Nachteile bei den NOx-Emissionen und beim Wirkungsgrad (orange Linie). Für eine realistische Bewertung ist jedoch ein Vergleich bei gleichem Ladedruck sinnvoller. Hier erreicht die gemischbildungsoptimierte Variante des DI einen Vorteil bei den NOx-Emissionen bei gleichem Motorwirkungsgrad (grüne Linie).



② Vergleich von NOx-Emissionen, Motorwirkungsgrad und Ladedruck zwischen PFI und DI in Abhängigkeit vom relativen Luft/Kraftstoff-Verhältnis

Für die Hochdruck-Direkteinspritzung (HP-DI) ist ein Druckniveau von etwa 300 bar erforderlich. Das Druckniveau heutiger Wasserstofftanks liegt bei 350 bar oder 700bar. Während der Entleerung sinkt dieser Druck. Das bedingt, dass HP-DI nur realisiert werden kann, wenn eine bordeigene Hochdruckerzeugung möglich ist. Ein großer Vorteil von HP-DI ist die mögliche Diffusionsverbrennung des Wasserstoffs und damit potenziell höhere Leistungsdichten. Allerdings bedingt eine diffusive Verbrennung auch höhere NOx Rohemissionen.

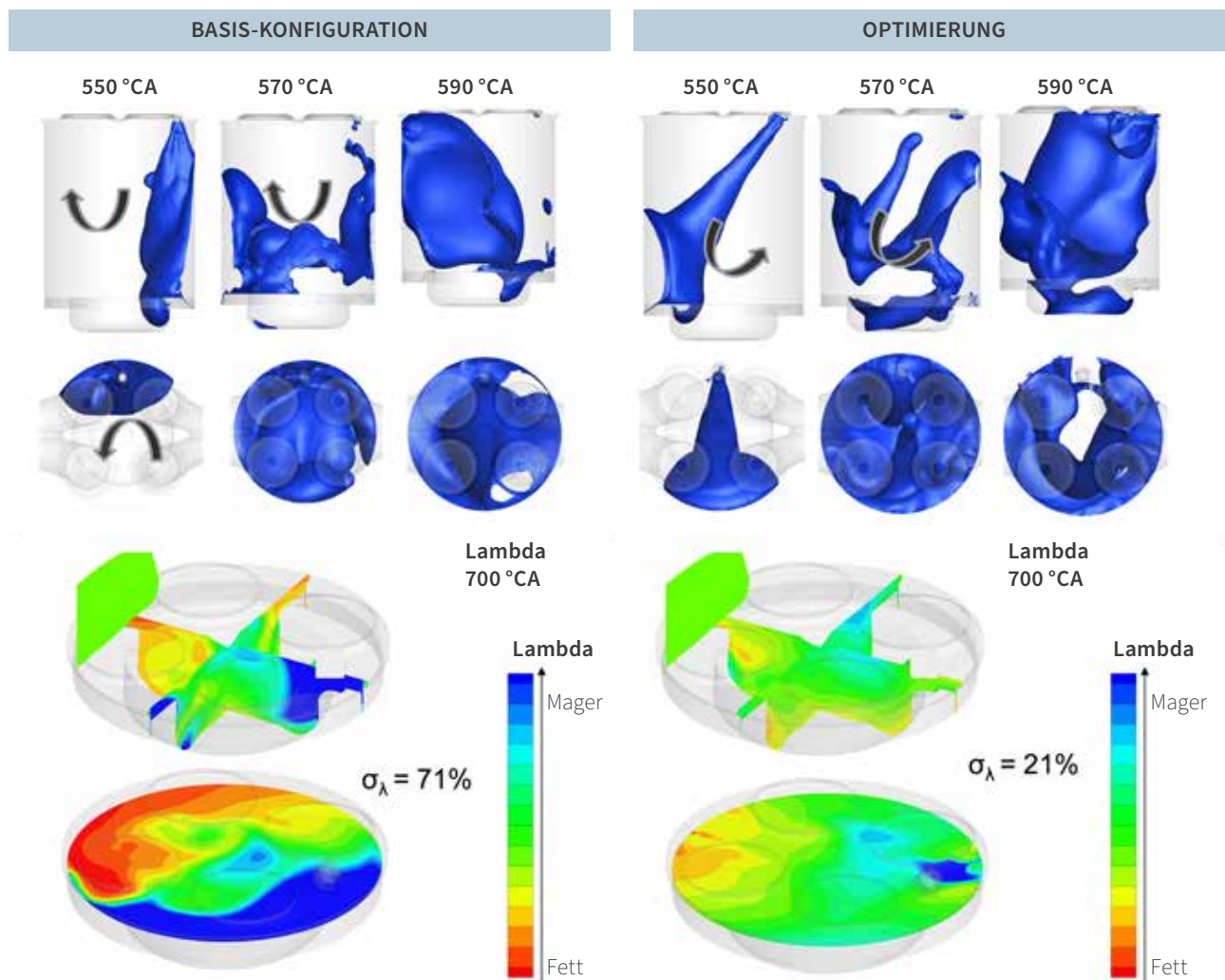
Im Vergleich zum PFI wird der Wasserstoff direkt in den Brennraum geleitet, dadurch verringert sich die Gefahr von Rückzündungen. Findet die Einblasung nach dem Schließen der Einlassventile statt, verringert sich der volumetrische Wirkungsgrad nicht, der Lastaufbau wird verbessert.

Simulationswerkzeuge

Optimierung der Gemischbildung eines DI-Systems mit 3D-CFD-Simulation

Die Gemischbildung ist der Schlüssel zur Verbesserung des Wirkungsgrades bei gleichzeitiger Reduktion der NOx-Rohemissionen. Das Zusammenspiel von Kraftstoffeingassung und Ladungsbewegung bestimmt die Homogenität des Gemischs.

Die Lage der Einspritzdüse (zentral oder seitlich) ist der wichtigste Parameter. Zur Lenkung des Wasserstoffstrahls können auch Blaskappen verwendet werden. Der Einspritzdruck bestimmt zusammen mit dem Austrittsquerschnitt die Durchflussmenge des Injektors. Höhere Durchflussraten sind wünschenswert, um eine kurze Einspritzdauer zu erreichen. Die Öffnungs- und Schließrampen des Einspritzprofils beeinflussen den



© Beispiel für die Optimierung der Gemischbildung mit 3D-CFD

Strahlimpuls erheblich, da langsamere Rampen das fette Gemisch nicht vom Injektor wegdrücken.

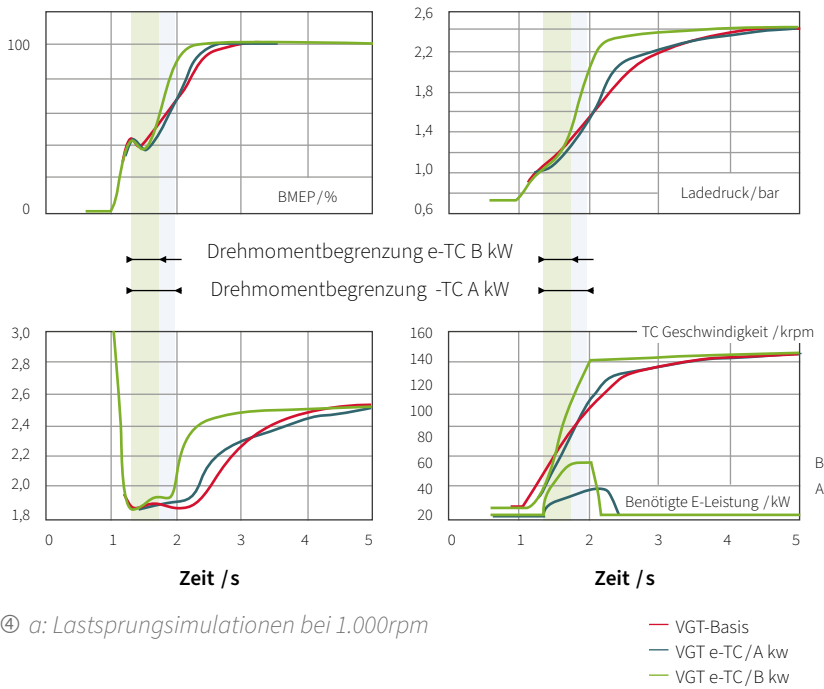
Zur Unterstützung der Gemischbildung können die beiden Arten der Ladungsbewegung, Drall und Tumble, genutzt werden. Simulationsergebnisse und Motorversuche zeigen, dass mit einer Tumblebewegung grundsätzlich eine bessere Homogenität erreicht werden kann. Soll ein fla-

cher Zylinderkopf beibehalten werden, kann durch entsprechende Kanalpassung auch eine Drallbewegung ausreichend gute Ergebnisse liefern. Die Wasserstoffeinspritzung interagiert auch mit der Ladungsbewegung und der Turbulenz durch ihren Impuls und ihre Scherung an der Strahlgrenze.

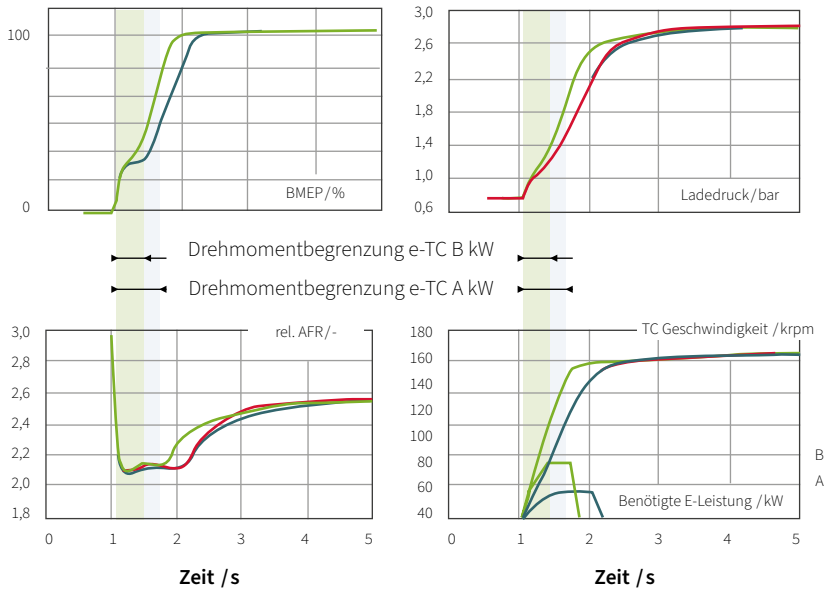
Um die oben genannten Parameter zu optimieren, setzt die FEV ihre H₂-Simulation tool chain ein. Ein Beispiel für die Gemischbildung ist in Abbildung 3 dargestellt. Es wurde eine Variation der aus den Ansaugöffnungen kommenden Ladungsbewegung, der Gestaltung der Sprühkappe, des Einspritzdrucks und des Einspritzzeitpunkts durchgeführt. Die Zielhomogenität für DI-Wasserstoffmotoren, dargestellt durch die Standardabweichung des Luft/Kraftstoff-Verhältnisses, wurde entsprechend der Leistung des Motors mit externer Gemischbildung festgelegt.



H₂



④ a: Lastsprungsimulationen bei 1.000rpm



④ b: Lastsprungsimulationen bei 1.500 U/min

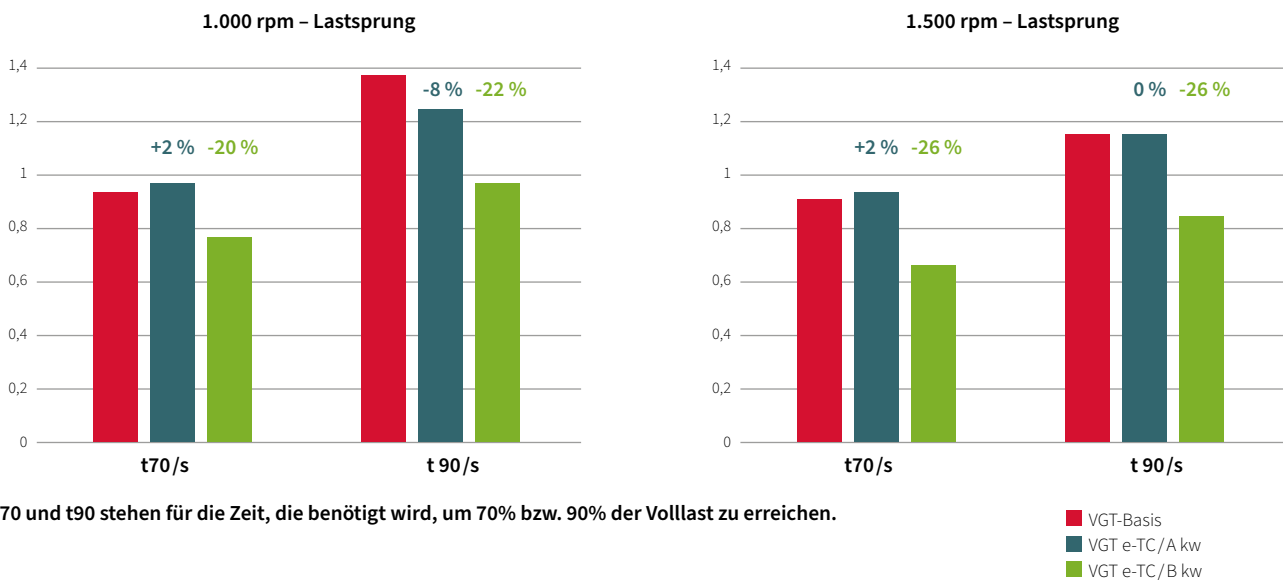
In Abbildung 3 ist die Isofläche von einem Prozent H₂-Massenanteil dargestellt. Bei der frühen Konfiguration wird der Wasserstoff aufgrund des Grunddralls im Zylinder in der Nähe der Zylinderlaufbuchse eingeschlossen. Die durch die Eingassung erzeugte Tumblebewegung ist nicht stark genug, um den Wasserstoff in die Mitte des Zylinders zu bringen. Im Rahmen der Optimierung wurde der von den Kanälen ausgehende Drall auf nahezu null reduziert. Das Design der Blaskappe wurde angepasst, um einen konventionelleren Tumble zu erzeugen. Die Kombination dieser Änderungen verbesserte die Homogenität des Gemischs deutlich. Um optimale Ergebnisse zu erzielen, muss für jede einzelne Motorkonfiguration eine dezidierte Untersuchung und Anpassung vorgenommen werden.

Bewertung des Lastaufbaus verschiedener Turboladertechnologien durch 1D-Simulation

Wie bereits erwähnt, sind die Ladedruckanforderungen für einen Wasserstoffverbrennungsmotor hoch. Es wurden 1D-Simulationen durchgeführt, um zu bewerten, wie ein e-Turbo den Lastaufbau verbessern kann.

Lastsprünge bei konstanter Motordrehzahl (1.000 U/min und 1.500 U/min) wurden für drei verschiedene Fälle untersucht (konv. VTG TC und zwei verschiedene e-TCs mit A kW bzw. B kW E-Power). Der Basis-VGT wurde von der Dieselvariante des Motors übernommen. Die Simulationsmodelle wurden mit Prüfstandsdaten abgeglichen.

Der Schwerpunkt liegt auf den niedrigen Motordrehzahlen, bei denen es eine Herausforderung ist, in kurzer Zeit ein ausreichendes Drehmoment im unteren Drehzahlbereich zu erreichen. Wie in Abbildung 4 dargestellt, wird das Lambda begrenzt, um Probleme mit klopfender Verbrennung zu vermeiden und die NO_x-Emissionen nicht übermäßig zu erhöhen.



© Auswertung der Lastsprünge

Abbildung 5 zeigt die verbesserte Reaktionszeit bei Verwendung eines e-Turbos. Mit einer elektrischen Unterstützung von A kW liegt das Einschwingverhalten in der Nähe des Basis-Turbolader-Layouts. Das Trägheitsmoment des e-Turbos ist höher. Es scheint, dass eine Unterstützung von mehr als A kW vorteilhafter wäre, um die zusätzliche Trägheit auszugleichen und eine kürzere Ansprechzeit zu erreichen. Das wird bestätigt durch das bessere Ergebnis des zweiten e-Turbo mit B kW.

Diese Fallstudie zeigt, dass ein bestimmtes E-Unterstützungsniveau, das über einer Mindestschwelle (hier A kW) liegt, für die Auslegung von e-Turbos in Betracht gezogen werden könnte, um einen verbesserten Lastaufbau zu erreichen. Zusätzlich ist die grundsätzliche Auslegung des e-Turbo auf hohe Leistung bei Lastaufbau weniger entscheidend als eher die Auslegung auf hohes Moment, da speziell in der ersten Phase des Lastaufbaus beide e-Turbos drehmomentlimitiert sind.

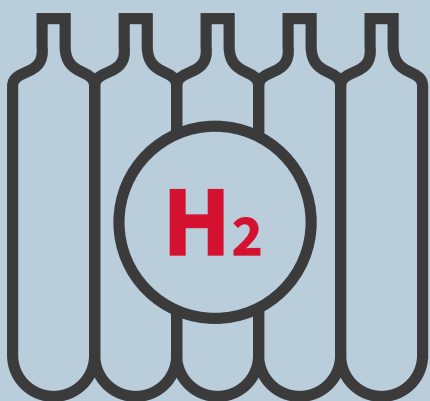
Strategie der Motorsteuerung

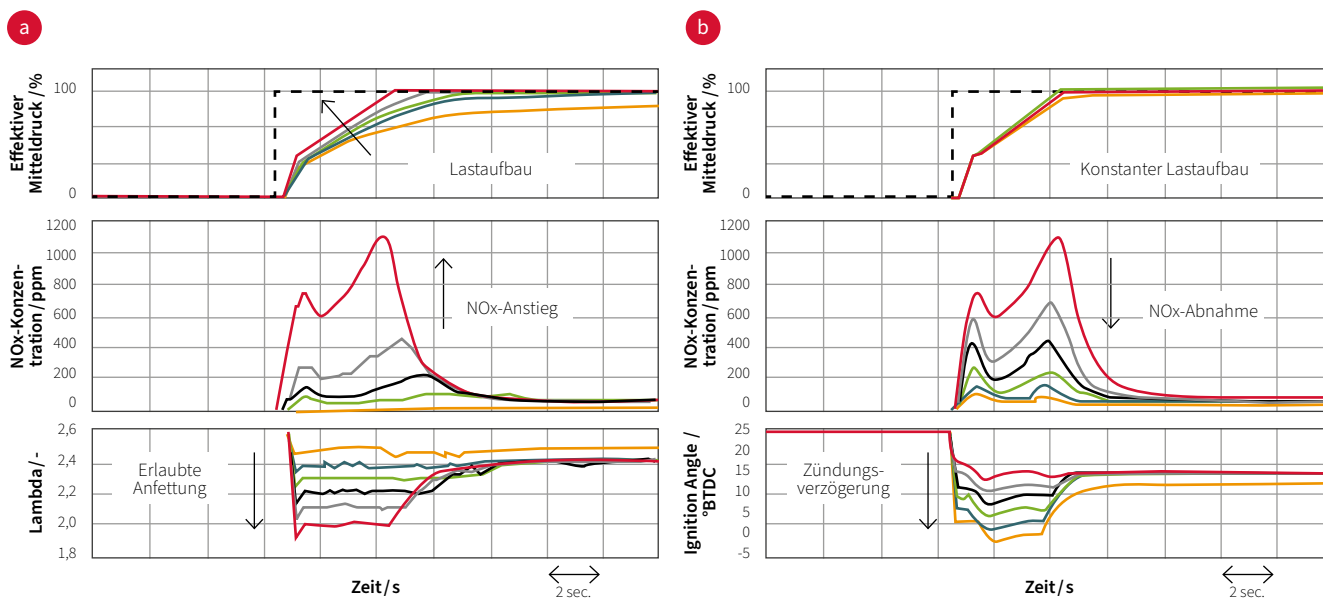
Die NO_x-Rohemissionen hängen hauptsächlich vom relativen Luft-Kraftstoff-Verhältnis und der Lage des Verbrennungsschwerpunkts ab.

Wie in Abbildung 6a) dargestellt, unterstützt die Absenkung des Luft-Kraftstoff-Verhältnisses (Anfetten) einen schnelleren Lastaufbau. Abbildung 6b) zeigt, dass die NO_x-Emissionen bei gleichbleibender Zeit für den Lastaufbau durch eine Zündungsspätverstellung verringert werden können. Es ist jedoch ein Nachteil beim Motorwirkungsgrad zu erwarten.

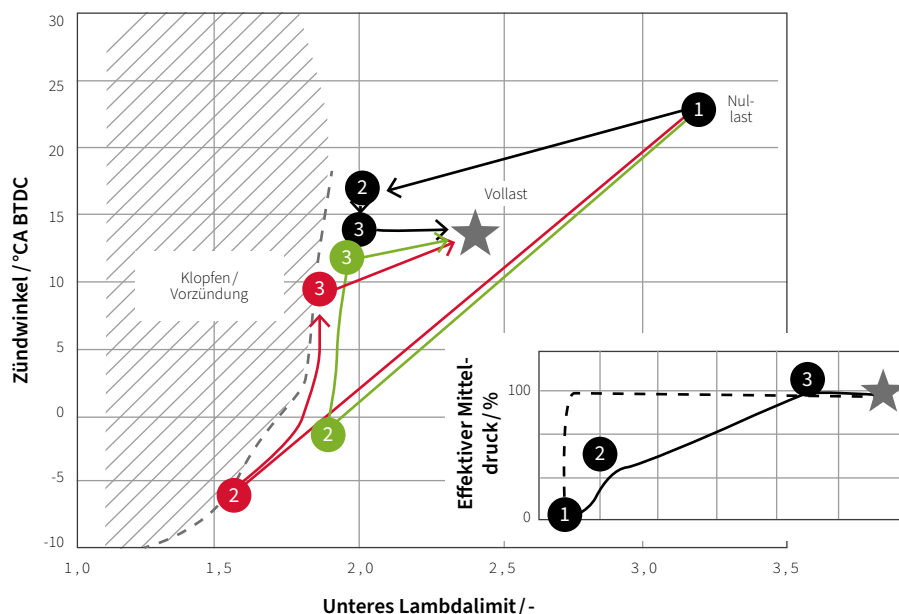
Es ist auch zu erkennen, dass die NO_x-Emissionen mit der höheren Verbrennungstemperatur, die durch das fettere Gemisch bedingt ist, ansteigen.

In Abbildung 7 zeigt die schwarze Kurve eine Basisregelung, die auf einen Lambda-Wert von 2 und einen Verbrennungsschwerpunkt von 8°CA ATDC während eines Lastsprungs abzielt. Die Strategie für den schnellsten Lastaufbau ist in rot dargestellt. Sie ermöglicht die maximale Anfettung während des Lastsprungs. Ein fetteres Lambda führt zu NO_x-Spitzen, wie zuvor gesehen. Der minimale Lambdawert





⑥ a: Lastsprung mit zulässiger Anreicherung.
b: Lastsprung bei konstantem Luft-Kraftstoff-Verhältnis (AFR=2)



Lastsprung von 0 - 100 % BMEP bei 1400 rpm
 — Strategie bei Lambda wert 2 und XMB50 8°C ATDC
 — Strategie bei minimalem Lambda wert
 — Strategie bei max. NOx-Grenzwert

⑦ Laststufenstrategien mit Wasserstoffverbrennungsmotor

wird durch die Klopfgrenze begrenzt. Die grün dargestellte Strategie zielt auf den schnellsten Lastaufbau unter der Bedingung eines maximalen NOx-Grenzwertes ab. Welche Strategie genutzt werden soll, hängt vom Zustand des Abgasnachbehandlungssystem und den geltenden Emissionsgrenzwerten ab.

Bereits durchgeführte Untersuchungen an einem 6-Zylinder-Wasserstoffmotor zeigen NOx-Rohemissionswerte, mit spezifischen Werten von 0,51 g/kWh für einen warmen WHTC. In Kombination mit einem dieselähnlichen Abgasnachbehandlungssystem, bestehend aus einem Oxidationskatalysator und einem SCR, könnten die NOx-Abgasemissionen auf 0,050 g/kWh gesenkt werden.

Von

Thomas Durand · durand@fev.com
 Dr. Lukas Virnich · virnich@fev.com

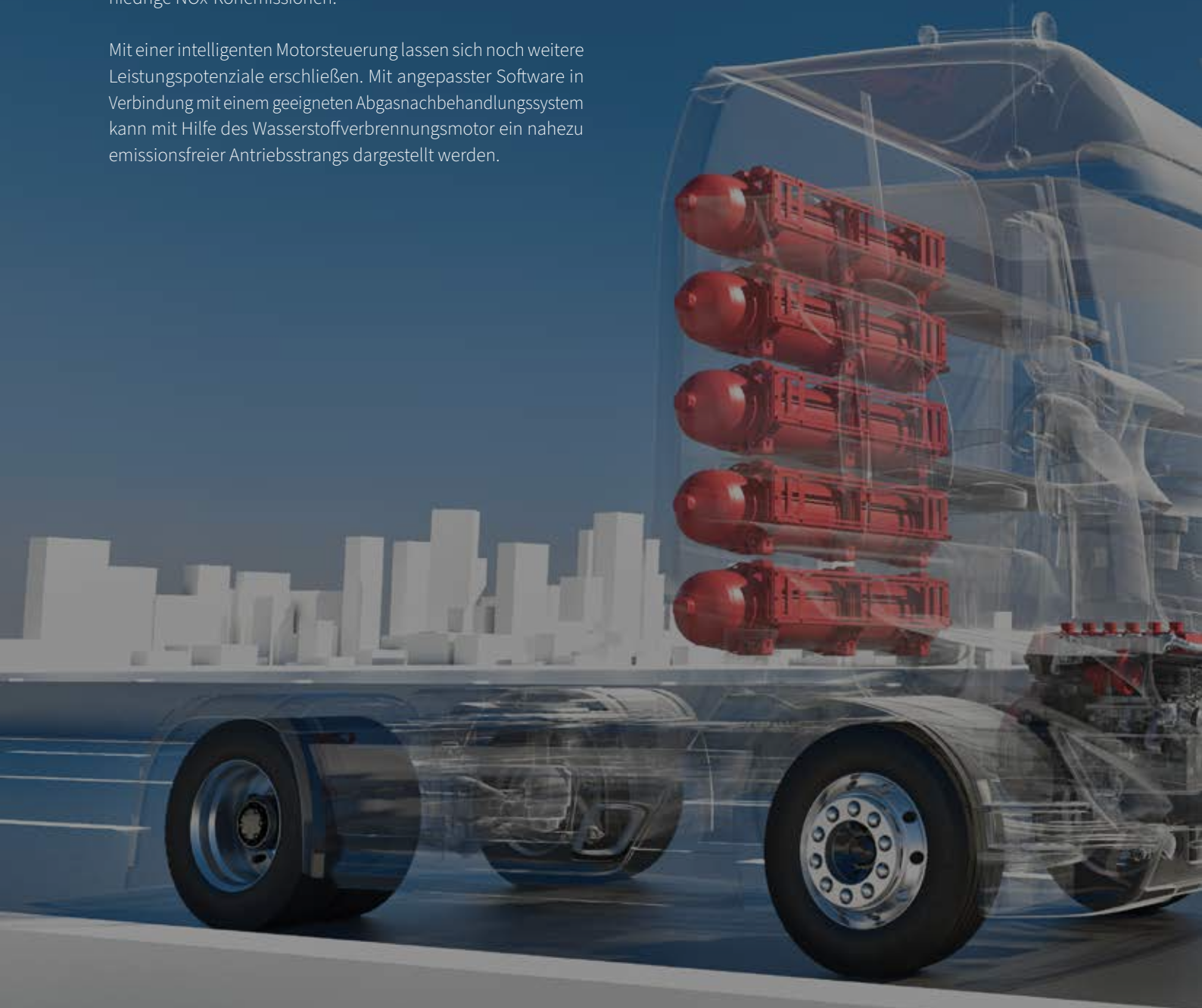
Die Erstveröffentlichung der Inhalte dieses Artikels erfolgte beim diesjährigen Internationalen Wiener Motorensymposium.

Zusammenfassung und Ausblick

PFI bietet Vorteile hinsichtlich einer schnellen Markteinführung, der Reife der Hardware und einer relativ einfachen Integration. Allerdings ist PFI in Bezug auf die Betriebssicherheit, die Leistungsdichte und das Lastaufbauverhalten limitiert. Elektrisch unterstützte Aufladung kann diesen Nachteil verkleinern.

DI hat großes Potenzial, das Lastaufbauverhalten zu verbessern. Magerer Volllastbetrieb und ultramagerer Teillastbetrieb ermöglichen einen hohen Motorwirkungsgrad und gleichzeitig niedrige NOx-Rohemissionen.

Mit einer intelligenten Motorsteuerung lassen sich noch weitere Leistungspotenziale erschließen. Mit angepasster Software in Verbindung mit einem geeigneten Abgasnachbehandlungssystem kann mit Hilfe des Wasserstoffverbrennungsmotor ein nahezu emissionsfreier Antriebsstrang dargestellt werden.



DIE KOMPLEXITÄT VON ADAS/AD-SYSTEMEN BEWÄLTIGEN

ADAS/AD-Funktionen können nicht als isolierte Einheiten behandelt werden. Sie werden nicht nur mit allen Bereichen des Fahrzeugs interagieren – wie Lenkung, Bremsen, Antriebsstrang oder Infotainment – sondern auch mit einer intelligenten Infrastruktur und digitalen Karten.

Durch unseren szenariobasierten Systementwicklungsansatz unterstützen wir unsere Kunden bei der Bewältigung dieser Komplexität.

Mobilität digitalisieren,
Menschen vernetzen.



Mehr Infos unter
www.fev.io



BRAKE

STEER

WARN

ACTIVE L

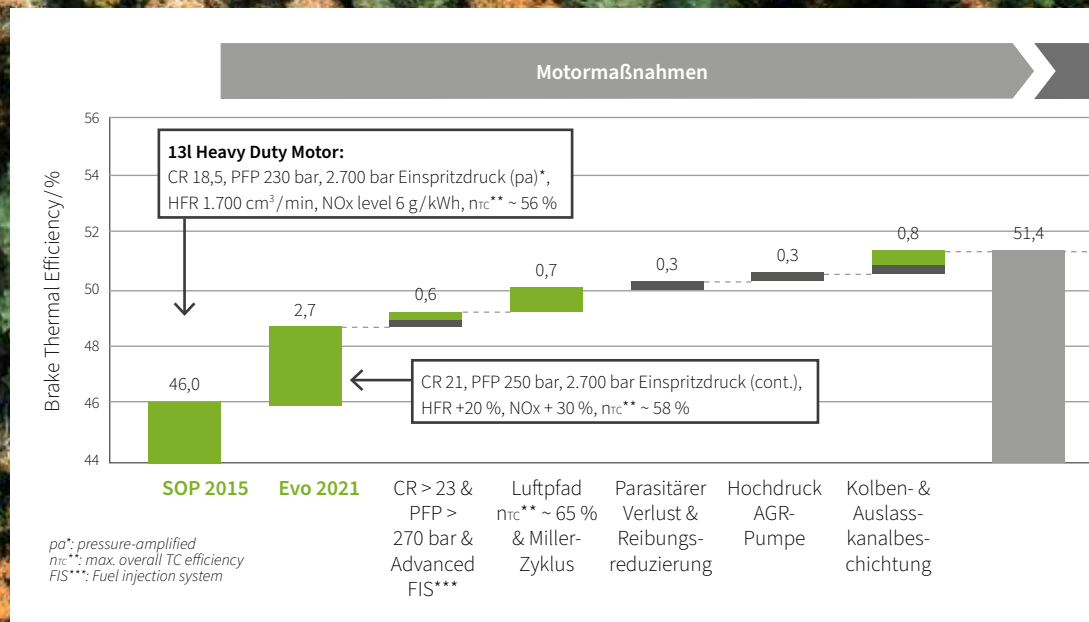
INT*3 +

THE SENSOR GROUP 1-12

FEV.io

THERMISCHER WIRKUNGSGRAD

DER WEG ZUM 55 %-BTE- NUTZFAHRZEUGMOTOR

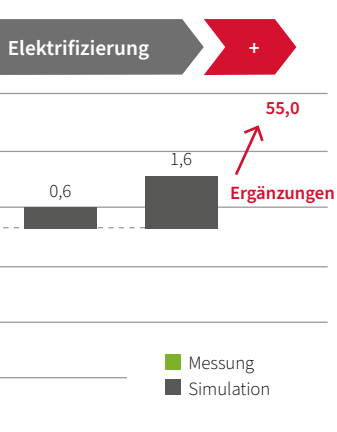


Der in den letzten Jahrzehnten signifikante Anstieg der CO₂-Emissionen wirkt sich negativ auf das Klima aus und beschleunigt die globale Erwärmung. Um weitere irreversible Schäden des globalen Klimas zu verhindern, haben die Regierungen strenge CO₂-Ziele für das nächste Jahrzehnt festgelegt; insbesondere für den Schwerlastverkehr, der einen erheblichen Anteil an den anthropogenen CO₂-Emissionen verursacht. Damit das ehrgeizige Ziel einer 30-prozentigen CO₂-Reduzierung der neuen Lkw-Flotten bis 2030 (im Vergleich zum Referenzzeitraum 2019/2020) erreicht wird, müssen alle Aspekte hinsichtlich Fahrzeugtechnologie optimiert werden. Der Verbrennungsmotor gilt dabei als wichtiges Schlüsselement als Teil des Antriebsstranges. Verbesserungen des Motorwirkungsgrads können in drei Hauptbereichen erzielt werden: erstens, die Verbrennung, einschließlich aller Maßnahmen, die sich im Brennraum auswirken, zweitens das Luftmanagement, das alle Ansaug- und Abgaskomponenten sowie das Aufladesystem umfasst und drittens alle parasitären Verluste aller Motorkomponenten, einschließlich Pumpverluste und mechanische Reibung. Dieser Beitrag beschreibt einen möglichen Weg zur Steigerung des Motorwirkungsgrads auf ein Niveau von 55 %.

Emissionsgesetzgebung 2025+

Im April 2021 hat die EU-Kommission erste Ideen für die geplante EU VII-Schadstoffemissionsgesetzgebung veröffentlicht. Die EU VII-Verordnung soll sicherstellen, dass künftige Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor unter allen Fahrbedingungen geringste Schadstoffemissionen ausstoßen müssen und das über die gesamte Lebensdauer eines Fahrzeugs. Dazu gehören die folgenden Randbedingungen:

- Einhaltung der Emissionsgrenzwerte unter allen Fahrsituationen und unter sehr weit gefassten Umgebungsbedingungen,
- Grenzwerte für neue Schadstoffe wie PN10 und N2O,
- Niedrigste leistungsspezifische Emissionen im warmen Betrieb der Abgasnachbehandlung (z. B. für NO_x ca. Faktor 8 niedriger als die heutige EU VI-Verordnung),
- Ganzheitliche Anrechnung der Kaltstartemissionen mit sehr herausfordernden Emissionsgrenzwerten (z. B. NO_x 100-150 mg/kWh nach einer motorischen Energieabgabe von 3 WHTC unter jeglichen Fahrprofilen),
- Vollständige Einhaltung der Emissionsgrenzwerte über eine Laufzeit von über 1,2 Mio km und Lebenszeit von 15 Jahren,
- Einführung des On-Bord Emission Monitoring (OBM) Systems, durch das zu jeder Zeit die Einhaltung der Emissionsgrenzwerte des Fahrzeugs gewährleistet wird.
- Um diese Anforderungen zu erfüllen, müssen selbst EU VI-Lkw, die den heutigen Gesetzesvorschriften entsprechen, eine deutliche Minderung der Kaltstartemissionen und sogar moderate Verbesserungen der Emissionen unter warmen Katalysatorbedingungen erreichen. Darüber hinaus sind ausgefeilte Regelungs- und Überwachungskonzepte erforderlich, um unter allen Fahrbedingungen niedrigste Emissionen zu gewährleisten.
- Die neuen Emissionsrichtlinien werden zu innovativen Abgasnachbehandlungssystemen (AGN) führen.



48 V Mild-Hybridisierung
Organic Rankine Cycle

CO₂-Flottenemissionen und Kunden-TCO als Treiber für Verbesserungen des Motorwirkungsgrads

Seit 2019 werden die CO₂-Flottenemissionen für alle neu zugelassenen schweren Lastkraftwagen der Kategorien 4, 5, 9 und 10 strikt reduziert. Die Reduktionsvorgaben betragen 15 % ab 2025 bzw. 30 % ab 2030 im Vergleich zum EU-CO₂-Flottendurchschnitt (Zeitraum 07/2019 bis 07/2020).

Die Höhe der Strafen ist bei Nichteinhaltung auf 4.250 Euro pro gCO₂/tkm im Jahr 2025 und 6.800 Euro pro gCO₂/tkm im Jahr 2030 festgelegt. Aufgrund dieser Strafmaßnahmen ist die Optimierung der derzeitigen Lkw zur Einhaltung der CO₂-Vorschriften von größter Bedeutung. Die Herausforderung besteht jedoch darin, dies auf eine kosteneffiziente Weise zu erreichen, da die Gesamtbetriebskosten (TCO), einschließlich der Anschaffungskosten des Lkw, für den Endkunden immer noch zu einer nachhaltigen Fortführung seines Unternehmens führen müssen.

Aus Sicht der Produktkosten ist es nach FEV interner Einschätzung am effizientesten, zunächst motorische Wirkungsgradverbesserungen umzusetzen. Die zusätzlichen Produktkosten, die für die Optimierung dieser eher konventionellen Bereiche wie Verbrennung, Luftmanagement und Reibungsreduzierung erforderlich sind, sind mit rund 400 Euro pro % CO₂-Reduktion sehr günstig.

Anders verhält es sich bei neueren Technologien wie der Hybridisierung des Antriebsstrangs, des Waste Heat Recovery (über Organic Rankine Cycle)

und der Anpassung alternativer Antriebsstränge wie der Brennstoffzellen.

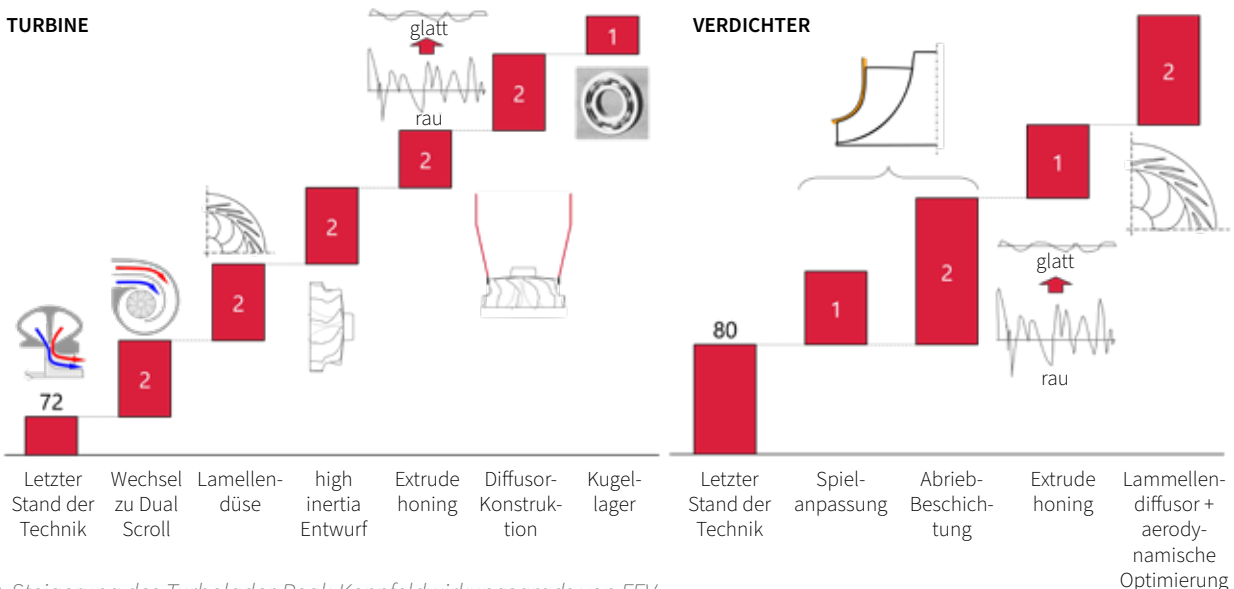
Hocheffiziente Antriebsstränge für schwere Nutzfahrzeuge

Abbildung 1 zeigt FEVs Technologie-Roadmap der Entwicklungen zukünftiger Nfz-Motoren. Diese Roadmap kombiniert die vielversprechendsten internen und externen motorische Maßnahmen, wie z. B. das Brennverfahren, das Luftmanagement und die Energierückgewinnung, um eine Wirkungsgradsteigerung in Richtung 55 % zu erzielen.

Die effektive Energierückgewinnung wird hauptsächlich durch ein elektrisches 48-V Waste Heat Recovery System (WHR) vollzogen. Diese zusätzliche elektrische Energie erfordert Motortechnologien, die für einen Mild-Hybridisierungsansatz vorgesehen sind. Die folgenden Abschnitte geben einen Überblick über die Forschungsaktivitäten der FEV an zukünftigen HD-Motorentwicklungen.

Mild-Hybridisierung

Ein 48 V P1 Mild-Hybrid-System mit einer Peak-Leistung von 16 kW ermöglicht neben dem Kraftstoffesparpotenzial durch Bremsenergieerückgewinnung, Elektrifizierung des Bremsluftkompressors und effizientere Stromerzeugung auch den Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors zu verbessern. Die Elektrifizierung der Kühlmittel- und Ölpumpe ist ein Ansatz zur Wirkungsgradoptimierung, indem der vom elektrischen WHR erzeugte Strom zum Antrieb verwendet wird. Dadurch können die mechanischen Pumpenantriebe zur Reibungsreduzierung entfallen. Die vollflexible Pumpendrehzahl ermöglicht einen optimalen Betriebspunkt maximaler Leistung



© Steigerung des Turbolader-Peak-Kennfeldwirkungsgrads von FEV

und damit ein effizienteres Kühl- und Schmiersystem. Insgesamt verbessert die Elektrifizierung des Motors den thermischen Wirkungsgrad um 0,6 % Punkte. Die P1-Maschine kann den Reststrom aus dem elektrischen WHR effizient auf die Motorkurbelwelle zurückgeben.

Brennverfahrensoptimierung

Die Weiterentwicklung des Verbrennungsprozesses ermöglicht den größten Schritt der motorischen Basismaßnahmen zur Verbesserung des thermischen Wirkungsgrades (BTE). Zu diesem Zweck wurde, ausgehend von einem optimierten Strahlbild der Einspritzdüse, die Form der Kolbenmulde mittels 3D-CFD-Simulation optimiert. Das Ergebnis war eine Stufenmuldenform mit einem Verdichtungsverhältnis von 21. Experimentelle Untersuchungen an einem Nfz-Einzylindermotor (SCE) bestätigten eine signifikante BTE-Erhöhung auf 48,7 %.


Darüber hinaus wurden weitere Hardwareänderungen vorgenommen. Ein neues druck-kontinuierliches Einspritzsystem (FIS) mit einem maximalen Einspritzdruck von 2.700 bar wurde zusammen mit einem reaktionsschnellen Injektor installiert. Eine weitere Anpassung bezieht sich auf eine effizientere Turbolader-Hardware, welche eine 2021 Best-in-Class-Konfiguration darstellt. Dies führt zu leicht verringerten Ladungswechselverlusten. Darüber hinaus ist für die Bewertung des Verbrennungswirkungsgrads ein erhöhtes NO_x-Rohemissionsniveau von 8 g/kWh betrachtet worden.

Diese Untersuchungen führten zu dem bekannten Zielkonflikt zwischen Spitzenzündungsdruck (PFP) und Verbrennungswirkungsgrad. Das Potential eines erhöhten Verdichtungsverhältnisses in Abhängigkeit vom max. PFP wurde daher weiter analysiert.

Eine weitere Steigerung des Verdichtungsverhältnis in Richtung 23 führt zu einer zusätzlichen Steigerung des BTE um etwa 0,5 %-Punkte im Vergleich zum Verdichtungsverhältnis 21. Gleichzeitig muss eine Erhöhung des PFP um mehr als 20 bar berücksichtigt werden, um den maximalen Wirkungsgradgewinn zu erzielen.

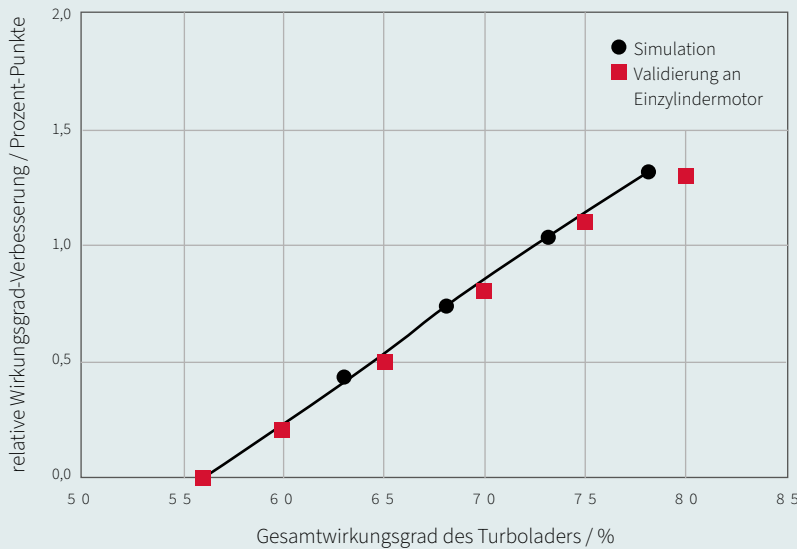
Verbesserungen im Luftmanagement

Zur Verbesserung des Luftmanagements werden im Wesentlichen drei Faktoren eingesetzt: ein verbessertes Turbolader-Matching mit einem Dual-Scroll-Turbolader (TC) und einem verbesserten Gesamtwirkungsgrad von bis zu 65 %, eine Anwendung des Miller-Zyklus durch spätes Schließen der Einlassventile und eine Hochdruck-AGR-Pumpe mit reduzierten Pumpverlusten. Die Optimierung erfolgte mit Hilfe eines 1D-Motorprozess-Simulationsmodells auf Grundlage eines modernen 13-Liter-Nfz-Motors inkl. des oben beschriebenen optimierten Brennverfahrens und einem BTE von 48,7 %.



**30-prozentige
CO₂-Reduzierung der
neuen Lkw-Flotten bis
2030**

(im Vergleich zum Referenzzeitraum 2019/2020)



③ Einfluss eines erhöhten maximalen Wirkungsgrads des Turboladersystems auf den BTE, ermittelt durch 1D-Simulation und Validierungsmessungen an einem Nfz-Einzylindermotor

Für jeden der folgenden Schritte wurde eine DoE-basierte Optimierung für TC-Matching, der Ventilsteuerzeiten, des Verdichtungsverhältnis und der Motorparameter wie Beginn der Einspritzung und AGR-Rate durchgeführt.

Abbildung 2 zeigt den Einfluss verschiedener Technologien bzw. Auslegungsvarianten des TC auf den Spitzenwirkungsgrad (stationäre Kennfeldmessungen auf einem Heißgasprüfstand). Im Wirkungsgraddiagramm werden die Maßnahmen auf der Turbinen- und Verdichterseite getrennt betrachtet, wobei die Lagerreibungsverluste im Turbinenwirkungsgrad enthalten sind. Mit dem Einsatz aller aufgeführten Technologien kann ein TC-Gesamtwirkungsgrad von mehr als 70 % erreicht werden. Die folgenden Technologien sind bereits ausgereift, wobei ihr Einsatz in der Serienproduktion stark von den Mehrkosten gegenüber den CO₂-Einsparungen abhängt:

Verdichter

- Verringerung des Spiels
 - Reduzierung des Spiels zwischen Gehäuse und Laufrad
 - Einlaufbelag (Abradable coating)
- Extrusionschonon
 - Reduzierung der Oberflächenreibung in der Volute
- Schaufeldiffusor
 - Verschiebung des Spitzenwirkungsgrads in Richtung geringeren Massenstroms
- Aerodynamische Optimierung
 - Zielkonflikt mit Trägheit. Signifikante Verbesserung möglich, wenn das Transientverhalten weniger relevant

Turbine

- Wechsel zu Dual Scroll
 - Reduzierung der Luftreibung in der Volute. Höhere aerodynamische Effizienz bei gleicher Beaufschlagung. Bessere Strömungstrennung der beiden Scrolls.
- Extrusionschonon
 - Reduzierung der Oberflächenreibung in der Volute

- Verringerung des Spiels
 - Kugellager sind tendenziell steifer und ermöglichen ein engeres Spaltmaß
- Aerodynamische Optimierung
 - Zielkonflikt mit Trägheit. Signifikante Verbesserung möglich, wenn das Transientverhalten weniger relevant
 - Leitschaufel zur Optimierung des Sweet Spots
 - Verlängerter Diffusor zur Erhöhung des Druckausgleichs hinter dem Turbinenrad

Der Einsatz und das Matching eines Dual-Scroll-TC mit einem Gesamtwirkungsgrad von 65 % führt zu einem Vorteil von etwa 0,4 %-Punkten im BTE. Der BTE-Einfluss einer Variation des TC-Wirkungsgrads unter der Annahme eines perfekten TC-Matchings ist in Abbildung 3 dargestellt. Näherungsweise gilt, dass eine Steigerung des TC-Wirkungsgrads um 10 % zu einer BTE-Verbesserung von 0,5 %-Punkte führen kann.

Mit zunehmender TC-Effizienz sinkt das Druckgefälle über dem Zylinder und verringert die Möglichkeit des AGR-Betriebs. Um weiterhin ein konstantes NO_x-Rohemissionslevel zu halten, ist eine AGR-Pumpe eine geeignete Option, die die Wahl des TC-Wirkungsgrads in Richtung höchster Wirkungsgrade ermöglicht und keine Nachteile beim TC-Matching verursacht. Gleichzeitig kann die Verbrennungsschwerpunktlage bei einem Kurbelwinkelzeitpunkt gehalten werden, der den besten Verbrennungswirkungsgrad gewährleistet, ohne dass der Einspritzzeitpunkt zur Senkung der NO_x-Emissionen nach Spät verschoben werden muss. Durch den Einsatz einer AGR-Pumpe konnten die Ladungswechselverluste um etwa 0,4 bar reduziert werden, was einem um

ca. 5,3 kW geringeren Motorleistungsbedarf entspricht, während der Antrieb der AGR-Pumpe bei einem Wirkungsgrad von 80 % eine Leistungsaufnahme von 0,8 kW hat. Der Gesamtnutzen der AGR-Pumpe kann daher mit bis zu 0,5 %-Punkten beziffert werden.

Schließen der Lücke zu 55 % BTE

Die oben beschriebenen Maßnahmen und weitere in der Roadmap erwähnte summieren sich zu einem BTE-Niveau von 53 %. Ein Schließen der Lücke in Richtung 55 % ist nur möglich, wenn anspruchsvollere oder weiter optimierte Technologien eingesetzt werden, wie z. B.:

- Einsatz von Niederdruck-AGR
- Turboladertechnologien, die Gesamtwirkungsgrade von >70 % erreichen
- Weitere Reduzierung der Wärmeverluste hinter dem Turbolader
- Erhöhung des Generatorwirkungsgrades des WHR-Systems

Diese Maßnahmen erfordern einen erheblichen Entwicklungsaufwand und sind Stand heute allesamt noch nicht Bestandteil von Forschungsaktivitäten.

Zusammenfassung

Die Vorgabe, die CO₂-Emissionen der Nutzfahrzeugflotte bis 2030 gegenüber dem Flottendurchschnitt von 2019 um 30 % zu senken, erfordert weitere Verbesserungen des Antriebsstrangs von schweren Nutzfahrzeugen. Da der Verbrennungsmotor auch in den kommenden Jahrzehnten für Nfz sehr wichtig sein wird, ist eine kontinuierliche Optimierung und Effizienzsteigerung anzustreben.

FEV hat das BTE-Verbesserungspotenzial motorischer Maßnahmen wie Verbrennungsoptimierung, Optimierung des Luftmanagements, Reduzierung von Reibung und parasitären Verlusten sowie Rekuperation von Abwärme analysiert. Ebenfalls berücksichtigt wurden Technologien zur Hybridisierung des Antriebsstrangs, die eine Rekuperation der Bremsenergie ermöglichen. Die folgenden Potenziale wurden identifiziert:

- Verbrennung: 3,9 %-Punkte BTE-Verbesserung
 - Neues Brennverfahren unter Verwendung von sehr hohem Verdichtungsverhältnis
 - Modernes FIS mit 2.700 bar Einspritzdruck
 - Thermische Kolbenisolation zur Reduzierung der Brennraumwärmeverluste
- Luftmanagement: 1,0 %-Punkt BTE-Verbesserung
 - Turbolader-Upgrade mit einem Gesamtwirkungsgrad von 65 % zur weiteren Reduzierung der Ladungswechselerluste
 - Einsatz einer AGR-Pumpe zur Realisierung hoher AGR-Raten bei negativen Druckdifferenzen zwischen Abgas- und Ansaugseite
- Reduzierung von Reibung und parasitären Verlusten: BTE-Verbesserung um 1,1 %-Punkte
 - Einsatz elektrifizierter Wasser- und Ölpumpe zur Reduzierung der Gesamtmotorreibung
 - Reduzierung des Wärmeübertrags durch thermische Isolierung von Abgaskanälen, Abgaskrümmern und Turboladergehäuse
- Rückgewinnung von Abwärmeenergie: 1,0 %-Punkt BTE-Verbesserung
 - Nutzung der Abwärmeenergie aus Abgas und AGR-Kühler zum Antrieb elektrifizierter Nebenaggregate und Rückführung der verbleibenden elektrischen Energie auf die Kurbelwelle

Insgesamt wurde eine BTE-Verbesserung von 7 %-Punkte nachgewiesen, was zu einem BTE-Niveau von 53 % führt. Um die Lücke zu 55 % BTE zu schließen, sind weitere Maßnahmen erforderlich, wie z. B. die Verwendung von Niederdruck-AGR, Turbolader mit einem Gesamtwirkungsgrad von mehr als 70 %, weitere Verringerung der Wärmeverluste hinter der Turbine oder hocheffiziente elektrische Generatoren. Die meisten dieser Maßnahmen werden sich jedoch nur auf der Fahrzeugebene auswirken, wo die angesprochenen BTE-Maßnahmen sich innerhalb des zur Verfügung stehenden Motorbaureichs installieren lassen.

Von

Kai Deppenkemper · deppenkemper@fev.com
Dieter van der Put · van-der-put@fev.com

Die Erstveröffentlichung der Inhalte dieses Artikels erfolgte beim diesjährigen Internationalen Wiener Motorensymposium.

BRENNSTOFFZELLE**FEV UNTERSTÜTZT GCK:
BRENNSTOFFZELLENTECHNOLOGIE
EROBERT RALLYE DAKAR**

Seit Jahrzehnten wird die berühmte Rallye Dakar von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren dominiert. Da die Organisatoren jedoch bis zum Jahr 2030 auf eine klimaneutrale Veranstaltung setzen, bildet die Dakar nun eine Bühne für Unternehmen, die die Leistungsfähigkeit ihrer emissionsfreien Mobilitätslösungen unter Beweis stellen wollen.



Die Brennstoffzelle muss besonderen Anforderungen standhalten



Erfahren Sie mehr
über den „e-Blast H₂“

www.fev.com/GCK-video

Im November 2020 veröffentlichte GCK Motorsport seine Pläne, bei den Cross-Country-Rallye-Teilnahmen des Teams künftig auf eine nachhaltige Brennstoffzellen-Technologie zu setzen. Dieser ambitionierten Strategie folgend, wird GCK mit Unterstützung von FEV das erste Team sein, das mit dem Brennstoffzellen-betriebenen Fahrzeug an der Dakar teilnehmen wird. Im Januar 2023 wird GCK mit dem „e-Blast H₂“ zunächst bei ausgewählten Etappen der Dakar antreten, ehe es sich im Folgejahr der ultimativen Herausforderung stellt und 2024 an der gesamten Veranstaltung teilnimmt.

FEV ist mit der eigenen, über 20-jährigen Expertise in den Bereichen Design, Softwareentwicklung und Brennstoffzellenintegration in GCKs Dakar-Engagement involviert. Der „e-Blast H₂“ verfügt dabei über eine Brennstoffzelle (BZ), die 30 kg Wasserstoff bei einem Druck von 700 bar in vier R134-zertifizierten Tanks speichert. Das System erbringt eine Leistung von 200 kW – und gehört damit zu den aktuell leistungsstärksten BZ-Systemen überhaupt. Darüber hinaus ist die Brennstoffzelle direkt mit einer Lithium-Ionen-Batterie der neuesten Generation verbunden, die 50 kWh erzeugt. Die Batterie wiederum treibt den neuen 2-Gang-Elektromotor von GCK an, der eine Leistung von 320 kW (435 PS) erbringt. Mit diesem System kann der „e-Blast H₂“ eine 250 km lange Wertungsprüfung komplett mit grüner Energie bestreiten.

Im „e-Blast H₂“ wird das System in der Wüste härtesten Bedingungen ausgesetzt sein. An insgesamt 13 Tagen werden mehr als 8.000 Kilometer zurückgelegt. Die Umgebungstemperaturen erreichen bis zu 50 °C, plötzliche Wetterumschwünge in Form von

Stürmen, Staub und ständige Erschütterungen mit Kräften von mehr als 10 g durch die holprigen Strecken wirken kontinuierlich auf das Fahrzeug und das Brennstoffzellensystem ein. Es spricht für den hohen Anspruch von GCK und FEV, dass man sich mit der Rallye Dakar eines der härtesten Rallye-Raids weltweit als Herausforderung für die Entwicklung der Hochleistungsbrennstoffzelle ausgesucht hat.

Die Brennstoffzellen-Stacks werden von EKPO Fuel Cell Technologies, einem Joint Venture zwischen ElringKlinger und Plastic Omnium, geliefert. FEV integriert diese Komponenten im BZ-System und entwickelt zudem die Software für die Steuerung der Brennstoffzelle. Dafür arbeiten kontinuierlich 20 FEV Ingenieure aus Deutschland und Frankreich an diesem Projekt.

Aktuell läuft ein umfangreiches Testprogramm unter realen Rallye-Bedingungen zur Weiterentwicklung des Antriebsstrangs auf den speziellen unternehmenseigenen Prüfständen. Auch Umwelttests auf System- und Fahrzeugebene werden hierbei realisiert.

Zusammenfassend wird das System eine einzigartige Leistungs- und Energiedichte bieten, die sogar die Integration in leichteste Fahrzeuge ermöglicht. Mit Lösungen für die Kühlung, Kompression und Spannungsumwandlung, die an dieses Leistungsniveau angepasst sind, wird das Brennstoffzellensystem zukünftig den wachsenden Bedarf an Wasserstoffsystemen in allen Bereichen des Mobilitätsmarktes decken, von Lastwagen über Busse bis hin zu Industrieanlagen.

BATTERIEENTWICKLUNG

FEV UND PROLOGIUM ENTWICKELN FESTKÖRPER-BATTERIESYSTEME



FEV und ProLogium Technology, ein führender Hersteller von Festkörperbatterien, haben eine Absichtserklärung zur Zusammenarbeit bei der Entwicklung von Festkörperbatteriesystemen unterzeichnet. Beide Parteien nutzen ihr Know-how, um gemeinsam Energiespeichersysteme zu entwickeln, die auf ProLogiums einzigartiger Solid-State-Battery-Technologie (SSB) basieren. SSBs, deren Eigenschaften und innovative innere Struktur neue Batteriekonzepte erfordern, zeichnen sich durch eine Vielzahl von Vorteilen aus. Unter anderem sind sie eine geeignete Energiespeicher-Alternative mit besonders hoher Energiedichte für eine Vielzahl von Anwendungen, wie z. B. im Transportsektor.

Im Fokus der Absichtserklärung zwischen FEV und ProLogium stehen die Batterieentwicklung für Kunden, Vertriebsaktivitäten und die Zell-/Modulverifizierung auf Basis der Festkörperbatterietechnologie von ProLogium.

Vielversprechende Batterietechnologie

FEV arbeitet als technologieoffener Entwicklungsdienstleister im Bereich der E-Mobilität schon länger an Festkörperbatterielösungen. Mit ProLogium hat das Unternehmen nun einen renommierten Zellhersteller als Partner gewinnen können, der führend in der SSB-Technologie ist und eine ideale Ergänzung zur eigenen 360-Grad-Batterieentwicklung darstellt. FEV wiederum ist Dank der eigenen einzigartigen Entwicklungs- und Testkapa-

zitäten in der Lage, bei der Entwicklung von Spitzentechnologie alle regulatorischen Anforderungen und Kundenwünsche auf der ganzen Welt zu erfüllen.

Generell steigen die Anforderungen an Batterien für E-Fahrzeuge in Bezug auf Sicherheit, Energiedichte, Kosten und Lebensdauer. Festkörperbatterien gehören zu den vielversprechendsten Technologien, die Vorteile gegenüber Lithium-Ionen-Batterien mit flüssigen Elektrolyten bieten und in der E-Mobilität bisher meist eingesetzt werden. Darüber hinaus überzeugen SSBs durch einen zusätzlichen Laufleistungsvorteil aufgrund ihres geringeren Gewichts und kleineren Volumens bei gleicher Kapazität.



Um das Maximum aus dieser Technologie herauszuholen, liegen die Kernkompetenzen in der Zellentwicklung und der Integration auf Pack-Ebene. Auch die Algorithmen zur Steuerung der Technologie sind entscheidend, um die Vorteile in Bezug auf Energiedichte, Lebensdauer und Sicherheit zu realisieren.

Langjährige Erfahrung

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

Durch die Zusammenarbeit von FEV und ProLogium sollen der Automobilindustrie nun auch im Bereich der SSBs Lösungen angeboten werden, um einen innovativen, sauberen und effizienten Energieverbrauch von elektrifizierten Fahrzeugen schneller zu erreichen.

ProLogiumTechnology wurde 2006 gegründet und ist ein innovatives Energieunternehmen, das sich auf die Forschung, Entwicklung und Herstellung von Festkörperbatterien konzentriert und Batterielösungen der nächsten Generation für Elektrofahrzeuge in Verbrauchermärkten und industriellen Anwendungen anbietet. Durch jahrelang erprobte Kerntechnologien erfüllt ProLogium die Anforderungen an Batterien wie extreme Sicherheit, hohe Energiedichte und niedrige Kosten.

Mit seiner automatisierten Pilotproduktionslinie hat ProLogium fast 8.000 Festkörperbatterie-Musterzellen an globale Automobilhersteller für Tests und Modulentwicklung geliefert. ProLogium Technology ist derzeit der weltweit einzige Hersteller von Festkörperbatterien, der die Massenproduktion erreicht hat.

FEV

ProLogium

TREFFEN SIE ÜBER 7.000 FEV EXPERTEN IN UNSEREN INTERNATIONALEN ENGINEERING- UND SERVICE-ZENTREN



IMPRESSUM

SPECTRUM Nr. 75 · Ausgabe 02/2022
Redaktion
Marius Strasdat · FEV Europe GmbH
Gestaltung
Verena Mainz · FEV Europe 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

JOIN THE FEV TEAM
www.fev.com/karriere

Wer sagt, dass du
Familienleben und Karriere
nicht gleichzeitig
rocken kannst?

6. INTERNATIONALE KONFERENZ

ZERO CO₂ MOBILITY

15. – 16. NOVEMBER 2022
AACHEN · DEUTSCHLAND

JETZT FÜR
DIE KONFERENZ
ANMELDEN!
[WWW.ZERO-CO2-
MOBILITY.COM](http://WWW.ZERO-CO2-MOBILITY.COM)



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