



# SPECTRUM

ANTWORTEN AUF DIE MOBILITÄTSFRAGEN  
DER ZUKUNFT

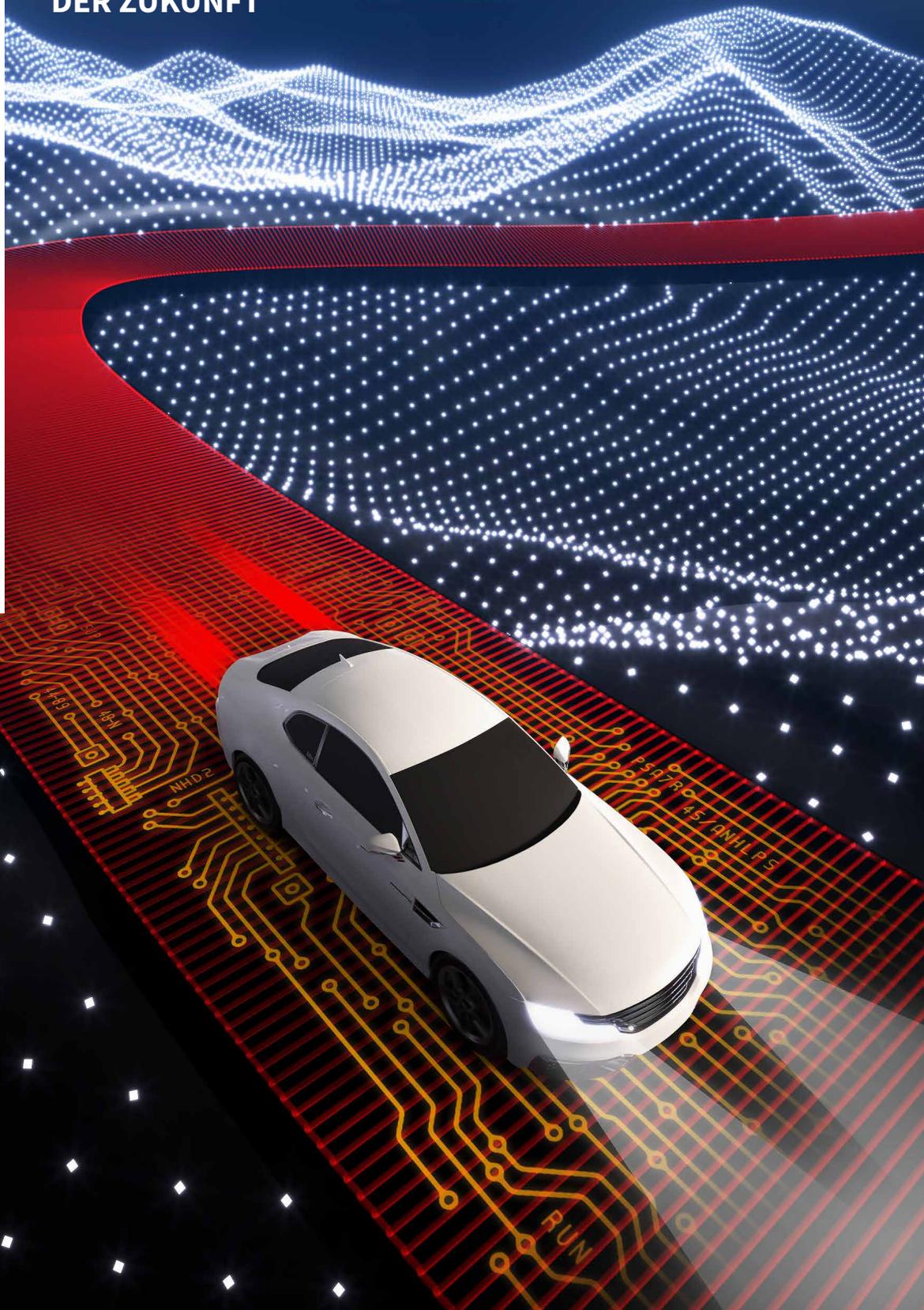
Automatisiertes Fahren

Softwareentwicklung

Gesamtfahrzeug-  
entwicklung

Grünes Methanol

Wasserstoffmotor



# Liebe Leser\*innen,

mit dem SPECTRUM möchte FEV seinen Kunden regelmäßig Einblicke in unterschiedliche, aktuelle Aufgabenbereiche geben.

Auf den folgende Seiten präsentieren wir im Kontext des automatisierten Fahrens und der damit einhergehenden steigenden Komplexität der Fahrzeugsysteme FEVs ganzheitliche Methodiken, die im Rahmen des Entwicklungsprozesses den Überblick und die Funktionalität des gesamten Systems sicherstellen. Durch die Vernetzung der Fahrzeuge mit der Außenwelt erweitert sich zudem die Vielfalt des Anforderungsspektrums an die entsprechenden Kompetenzen in der Softwareentwicklung. FEV hat im Laufe der Zeit ein globales Netzwerk an Software Engineering Centern aufgebaut, das wir Ihnen mit seinen Vorteilen und Kompetenzen ebenfalls präsentieren möchten.

Betrachten wir die Entwicklung von sicherheitsrelevanter Software, wird oftmals eine Steigerung der Effizienz und Reduzierung der Zeit bis zur Markteinführung angestrebt. Wir stellen Ihnen in dieser Ausgabe unseren zweiseitigen Ansatz vor, mit dem dies gelingt, ohne Kompromisse bei den Qualitätsanforderungen einzugehen.

In einem weiteren Artikel beleuchten wir, wie FEV im Rahmen der Gesamtfahrzeugentwicklung die Komplexität der dabei auftretenden Aufgaben über unterschiedliche Disziplinen hinweg koordiniert und das vorhandene Experten-Know-how für den Kunden auf allen Ebenen optimal und „aus einer Hand“ einbringt.

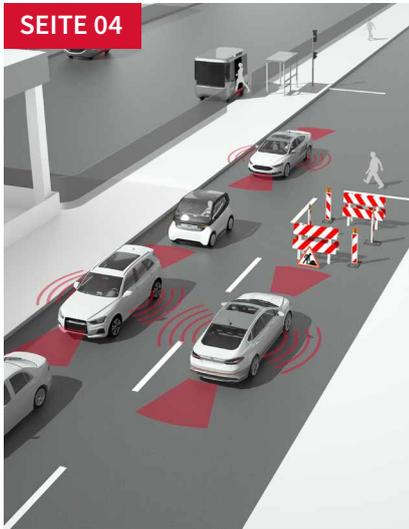
Außerdem gehen wir auf innovative Antriebslösungen ein, mit denen die ambitionierten Ziele zur Emissionsreduzierung erreicht werden können – etwa ein neuartiges Abgasnachbehandlungssystem für schwere Nutzfahrzeuge, den synthetischen Kraftstoff Methanol oder einen optimierten Wasserstoffmotor.

Ich wünsche Ihnen eine spannende Lektüre. Neuigkeiten und weitergehende Informationen zu unseren Tätigkeitsfeldern finden Sie übrigens auf unseren Online-Kanälen, beispielsweise [www.fev.com](http://www.fev.com).



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





SEITE 04  
Entwicklung von hochautomatisierten Fahrfunktionen ab SAE Level 3



SEITE 20  
Geballte Fahrzeugkompetenz unter einem Dach



SEITE 46  
Verbesserte transiente Performance des Wasserstoffmotors bei gleichzeitig niedrigsten NO<sub>x</sub>-Emissionen

**01 LÖSUNGEN FÜR AUTOMATISIERTES FAHREN UND SOFTWAREENTWICKLUNG**

- 04** Entwicklung von hochautomatisierten Fahrfunktionen ab SAE Level 3
- 10** Wandel der Herausforderungen in der automobilen Softwareentwicklung
- 12** Softwarebasierte Funktionen – Entscheidende Designfaktoren in der Automobilwelt

**03 NEWS**

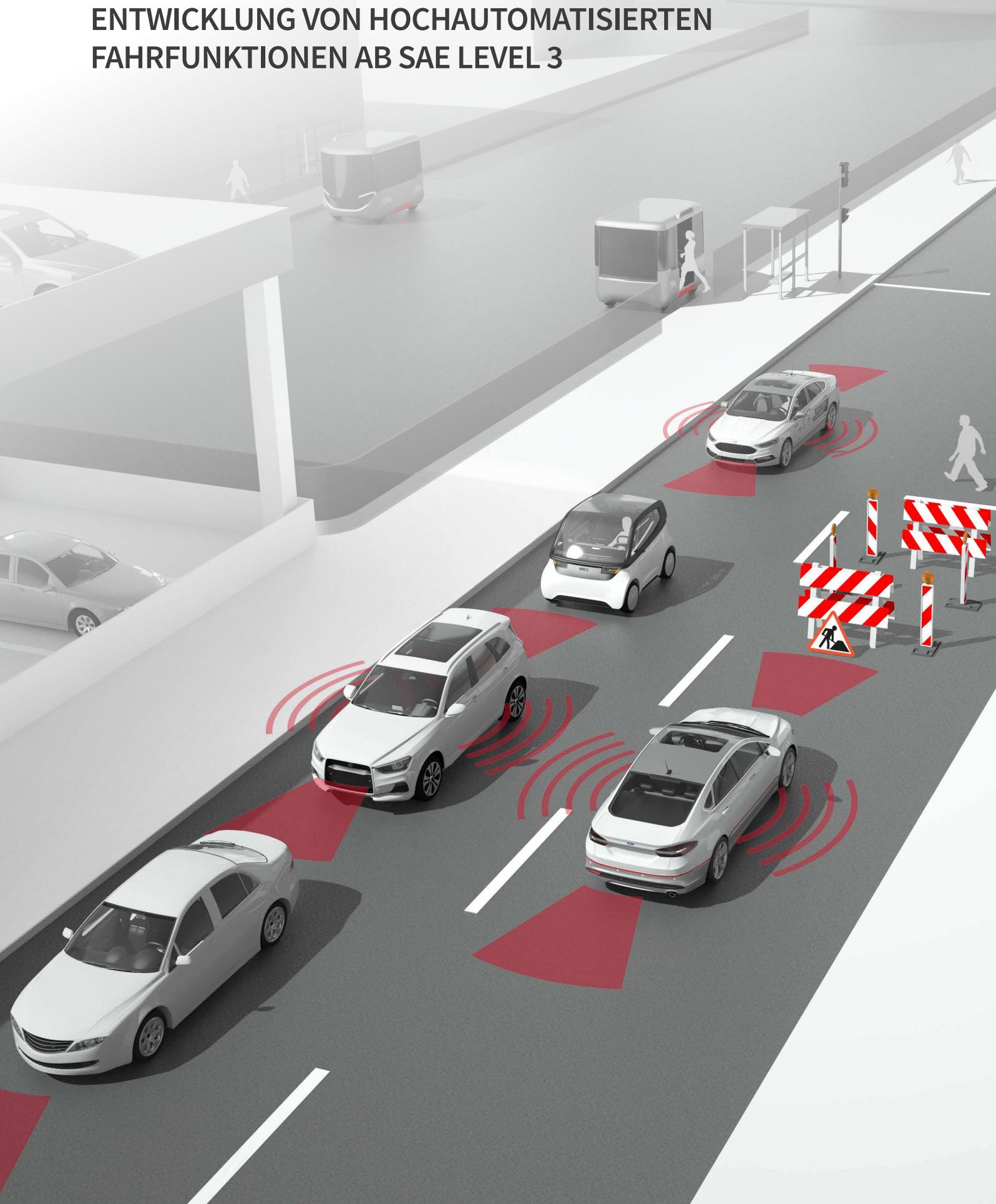
- 52** eDLP Komponenten-Umwelttests – Einzigartige Prüfkapazität

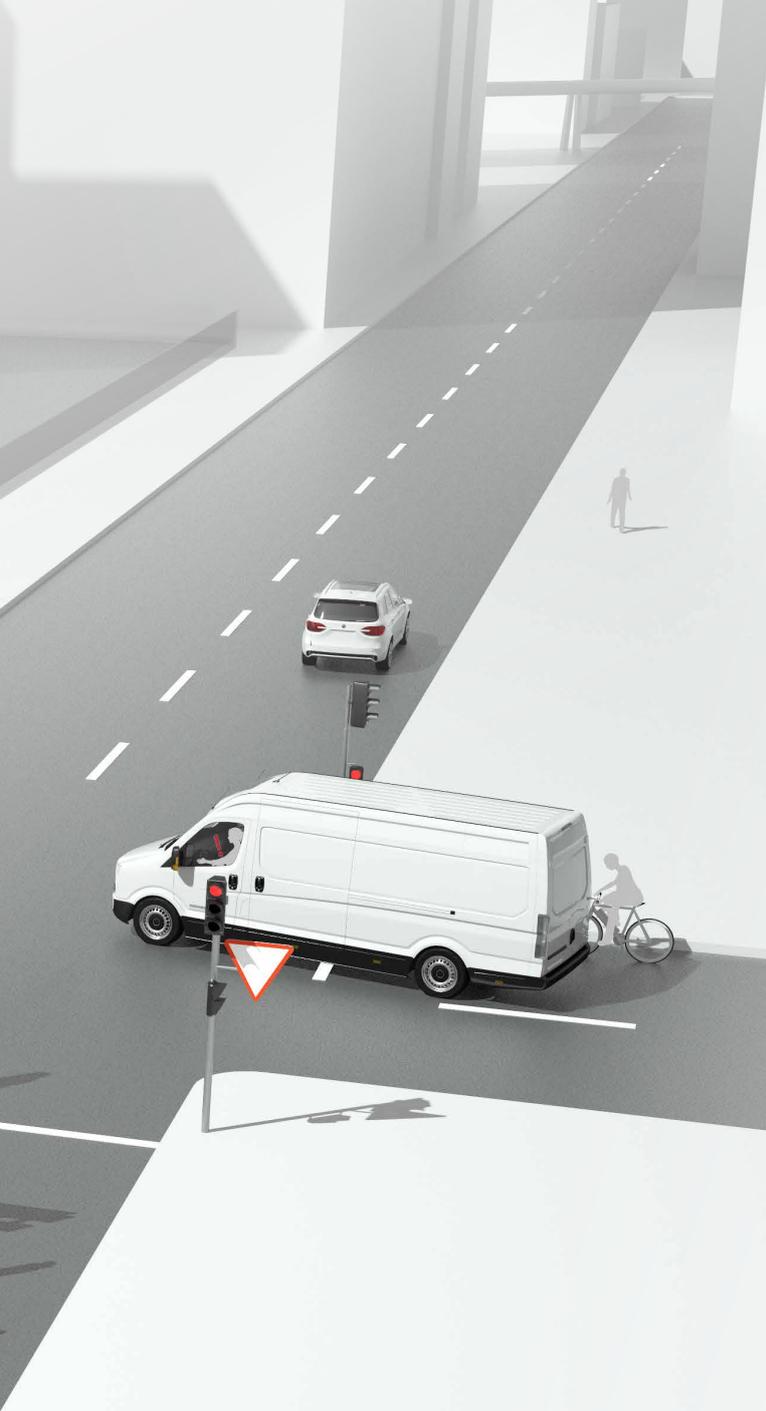
**02 TECHNISCHE ENTWICKLUNG MADE BY FEV**

- 20** Gesamtfahrzeugentwicklung – Geballte Kompetenz unter einem Dach
- 28** Truck EATS – Ein neuartiges Abgasnachbehandlungssystem für schwere Nutzfahrzeuge mit geringsten NO<sub>x</sub>-Emissionen
- 34** xHEV-Konzept zur Erreichung der CO<sub>2</sub>-Ziele im Jahr 2030
- 40** Grünes Methanol – Ein CO<sub>2</sub>-neutraler Kraftstoff zur Erreichung höchster Wirkungsgrade bei niedrigsten Schadstoffemissionen
- 46** H<sub>2</sub>-ICE – Wie die transiente Performance des Wasserstoffmotors bei gleichzeitig niedrigsten NO<sub>x</sub>-Emissionen verbessert werden kann

## AUTOMATISIERTES FAHREN

# ENTWICKLUNG VON HOCHAUTOMATISIERTEN FAHRFUNKTIONEN AB SAE LEVEL 3





**F**ahrerassistenzsysteme wie automatische Abstands- und Spurhaltefunktionen erhöhen bereits heute die Sicherheit, den Fahrkomfort und sogar die Energieeffizienz. Während langer Fahrten oder im Stop-and-Go-Verkehr wünscht sich aber wohl jeder Fahrer einen Autopiloten, der die Fahrzeugsteuerung komplett übernimmt und es dem Fahrer erlaubt, sich mit fahrfremden Tätigkeiten zu beschäftigen. Dies ermöglichen hochautomatisierte Fahrfunktionen ab dem SAE Level 3, bei dem der Fahrer von der kontinuierlichen Überwachung des Fahrsystems und der Umgebung in bestimmten Fahrsituationen entbunden wird.

Diese sogenannten L3-Fahrfunktionen verursachen eine signifikant steigende Komplexität der Systeme. Der Wechsel der Fahrverantwortung vom Fahrer auf das Fahrzeug geht einher mit zunehmenden Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der Sensorik, an die Komplexität der Steuerungsfunktionen und an die benötigte Rechenkapazität. Eine umfassende Absicherung dieser Systeme für die unterschiedlichen Wetter- und Lichtverhältnisse muss für alle relevanten Verkehrsszenarien ebenso sichergestellt werden, wie die funktionale Sicherheit. In der Entwicklung müssen dafür alternative, ganzheitliche Entwicklungsumgebungen in Betracht gezogen werden, um den Überblick über das Verhalten des gesamten Systems behalten zu können.

Bei der technischen Entwicklung dieser Systeme besteht eine große Herausforderung darin, das Verhalten des Fahrzeugs innerhalb des von den verschiedenen Fahrsituationen definierten komplexen Gesamtsystems zu betrachten und abzusichern. Um diesen Herausforderungen begegnen zu können, wurden von FEV im Rahmen des gesamten Entwicklungsprozesses speziell auf diese Herausforderung zugeschnittene Methodiken entwickelt. Diese umfassen die Bereiche Systems Engineering, Datenmanagement sowie Funktions-, System- und Fahrzeugprobung und wurden bereits erfolgreich in Projekten mit Fahrzeugherstellern und Zulieferern eingesetzt. Im Rahmen des europäischen Forschungsprojekts „L3Pilot“ wird die Tauglichkeit automatisierter Fahrfunktionen auf öffentlichen Straßen getestet. Das Konsortium umfasst u.a. 13 Fahrzeughersteller, so dass eine sehr breite Anwendungs- und Erfahrungsbasis gegeben ist. FEV ist in diesem Projekt mit einem eigenen Versuchsfahrzeug vertreten. Der führende Entwicklungsdienstleister nutzt die wertvollen Erfahrungen aus der sehr praxisnahen Umsetzung für die Weiterentwicklung der Entwicklungs- und Erprobungsmethoden sowie vernetzter Datenlogger und das Datenmanagement.

## Szenarien- und modellbasiertes Systems-Engineering für die Entwicklung hochautomatisierter Fahrerassistenzsysteme

Das hier vorgestellte Szenarien- und modellbasierte Systems-Engineering-Konzept bringt in diesem Zusammenhang deutliche Vorteile mit sich. Durch seine Anwendung können die Systemkomplexität beherrscht und die hohen, stetig zunehmenden Verifikations- und Validierungsaufwände für die automatisierten Fahrfunktionen kontrolliert werden.

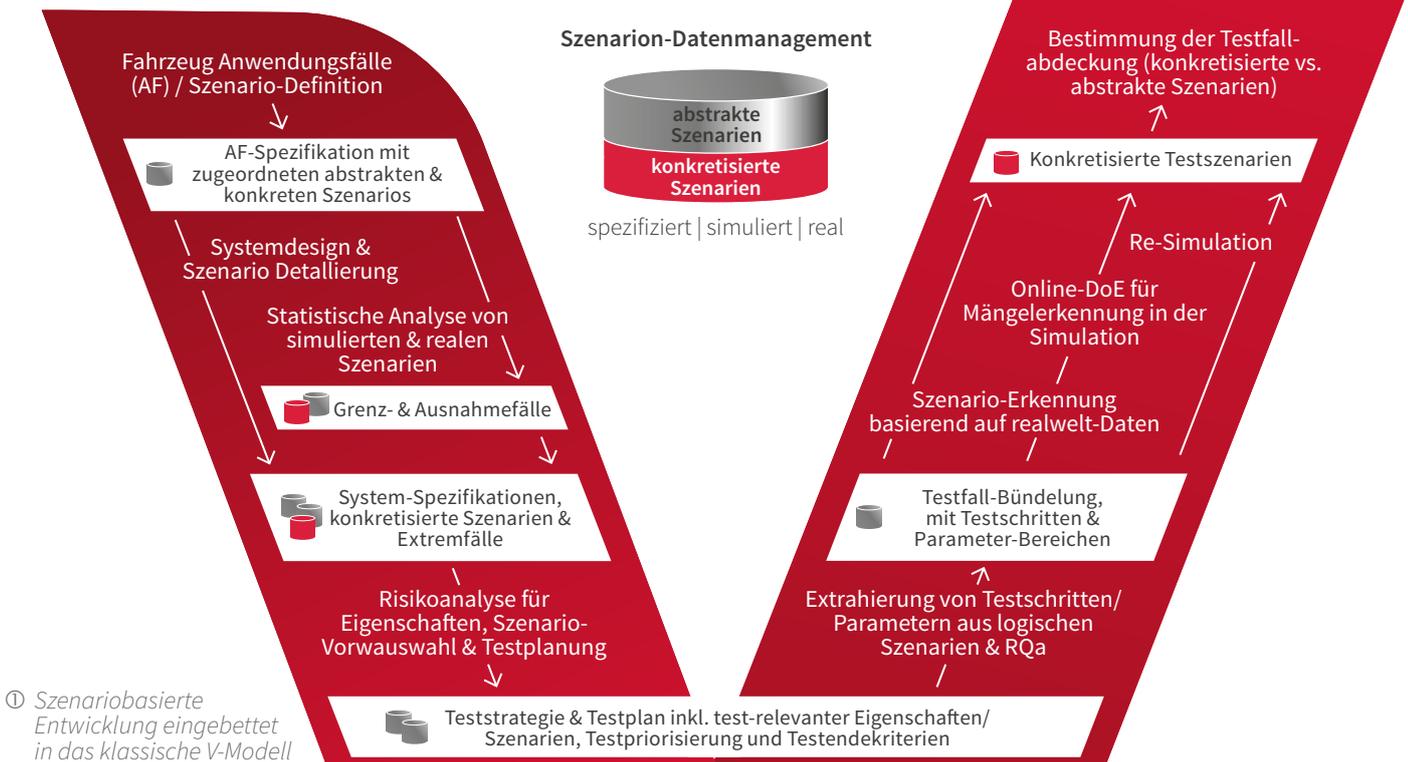
Im Rahmen des „Pegasus Projektes“<sup>(1)</sup> des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt, welches vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert wurde, sind im vergangenen Jahr die Grundlagen für eine Absicherung von automatisierten Fahrfunktionen geschaffen worden. In diesem Forschungsprojekt wurde vor allem die Fragestellung „Wie gut ist gut genug?“ adressiert. Das heißt, wie können sinnvolle Testendekriterien für AD-Funktionen definiert werden, die auch eine gesellschaftliche Akzeptanz der neuen Mobilitätsform begünstigen? Hierbei wur-

de im Projekt der „Autobahn-Chauffeur“ betrachtet, für den beispielhafte Szenarien definiert wurden, um eine Validierung im Rahmen der Entwicklung zu ermöglichen. FEV hat, basierend auf den Ansätzen des „Pegasus Projektes“, ein eigenes Projekt zur Entwicklung einer Fahrfunktion für einen „Stau-Chauffeur“ durchgeführt und dazu einen modellbasierten Systems-Engineering-Ansatz (MBSE) als Basis gewählt, um die Komplexität der Anforderungen im Zuge der Produktentwicklung mit Engineering-Kompetenz handhabbar zu machen.

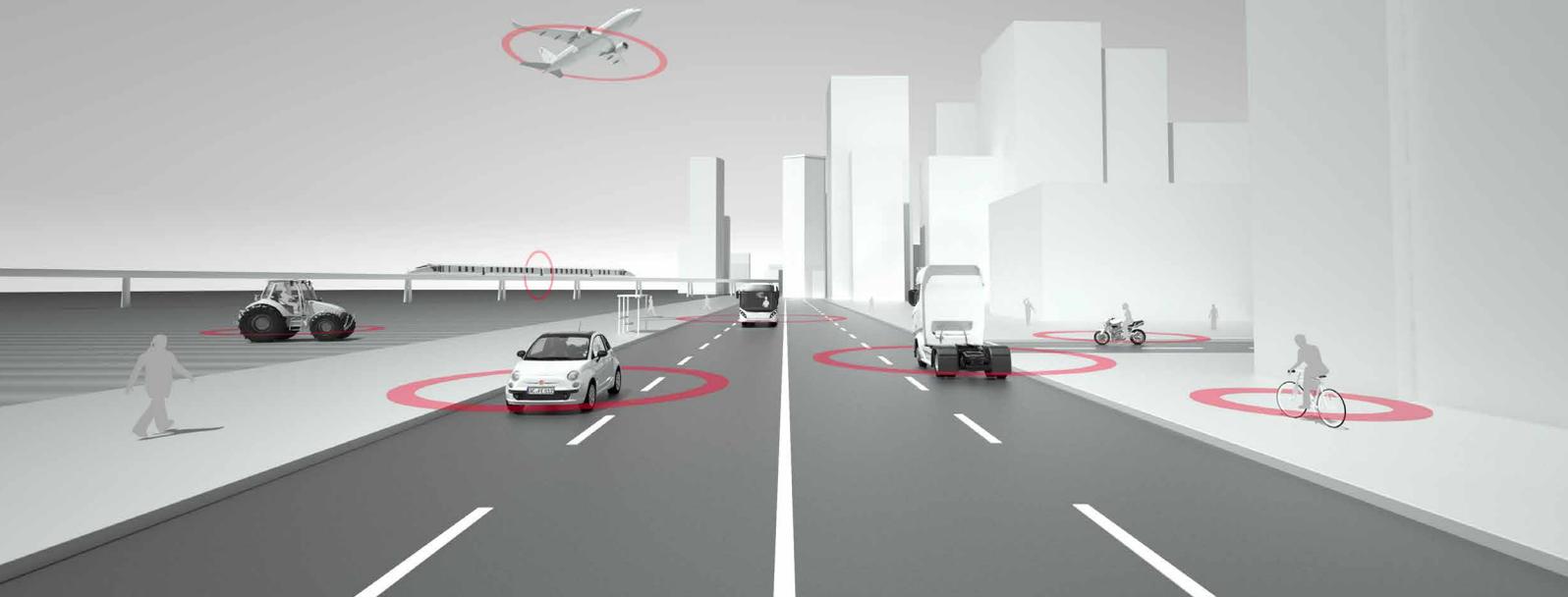
Die Entwicklung von automatisierten Fahrfunktionen orientiert sich bei FEV an aktuellen Standards wie ISO21448. Und insbesondere für SAE Level 3-5 am aktuellen Stand der Forschung. Dort skizzierte Schlüsseltechnologien werden weiterentwickelt und zur Serienreife gebracht. Szenarien stellen bei der Entwicklung von hochautomatisierten AD-Funktionen eine zentrale Methodik in Ergänzung zu klassischen Anwendungsfällen (Use Cases) und Anforderungen dar, um die Abbildung komplexer Verkehrssituationen für Architektur und Design von AD-Systemen greifbar und verständlich zu beschreiben. Es werden Szenarien oder „Use Cases“

genutzt, um das gewünschte Verhalten der Funktion unter Berücksichtigung aller relevanten Interaktionen mit der Umgebung, dem Fahrer und anderen Verkehrsteilnehmern zu definieren. Durch die Einbindung von Szenarien in den MBSE-Ansatz besteht zudem die Möglichkeit, sowohl die Absicherung der entwickelten Fahrfunktionen als auch eine bessere Nachverfolgbarkeit von der linken zur rechten Seite des Vorgehensmodells (V-Modell) in der Softwareentwicklung zu gewährleisten. Beispielsweise können genaue Testumfänge für einzelne Anforderungen zugeordnet und in Testplattformen zusammengefasst werden.

Ein Szenario beschreibt temporale Zusammenhänge zwischen verschiedenen Szenen. Szenen wiederum sind Augenblicksaufnahmen der Umgebung, dynamischer Elemente und aller Akteure



<sup>1</sup> Szenariobasierte Entwicklung eingebettet in das klassische V-Modell



ENERGIEEFFIZIENT



SICHER



KOMFORTABEL

sowie der Selbstdarstellung des Beobachters und der Beziehungen zueinander. Grundlegend bedeutet dies, dass „Szenarios“ über „Use Cases“ mit dem Kundennutzen und der Modellierung des Systemverhaltens inklusive der zugehörigen Anforderungen verknüpft werden. Somit sind sie das tragende Bindeglied innerhalb der Anforderungs-Entwicklung und die Grundlage für die Testfallerstellung.

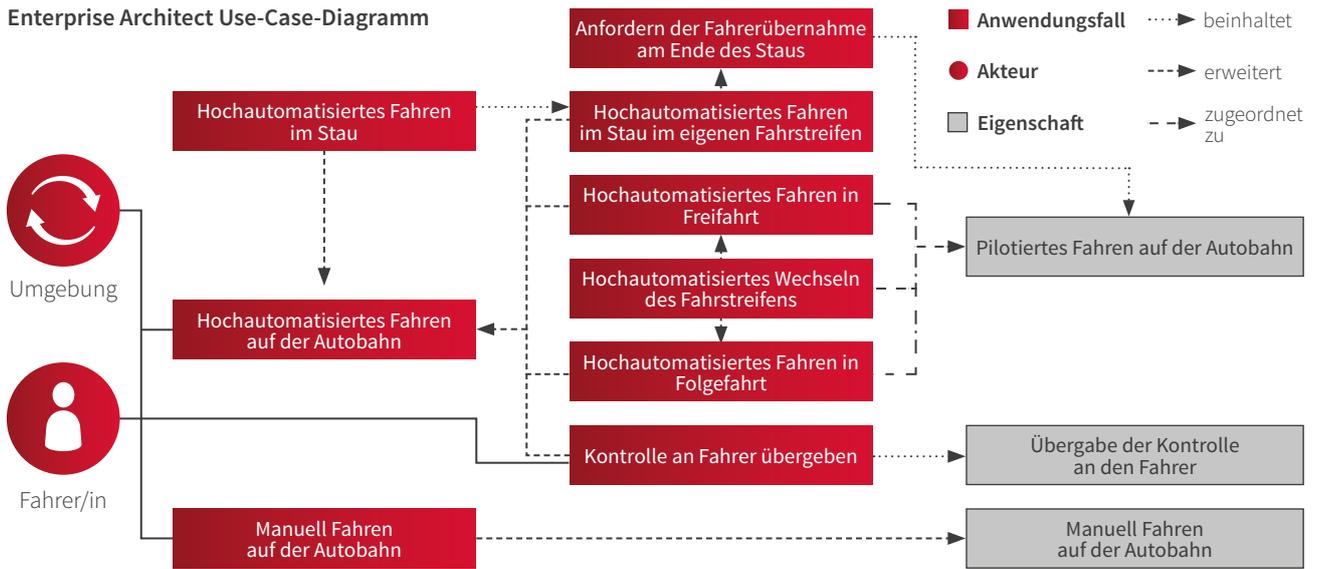
Im Rahmen der Anforderungserstellung innerhalb des MBSE-Ansatzes wird das Szenario als zentrales Element in die Entwicklungsumgebung mit eingebunden. Hilfreich ist hierbei auch die von FEV entwickelte Datenerfassungstoolkette. Sie erfasst mit Hilfe eines vernetzten Loggers Messdaten vom FEV eigenen autonomen Fahrzeug während der Testfahrt und kann diese bereits während der Messfahrt in Szenarien klassifizieren. Mit Hilfe gesammelter Daten können außerdem während der Validierungsphase auch direkt Szenarien annotiert und in entsprechenden Datenbanken für die Simulation vorbereitet

werden. Diese können mit den spezifizierten Szenarien abgeglichen werden, so dass sich der Szenarien-Kreislauf schließt und eine durchgängige Entwicklungskette von Systemdesign zu Systemtest und zurück realisiert wird.

Die Rahmenbedingung in dem genannten Beispielprojekt zur Entwicklung eines „Stau-Chauffeurs“ war, dass dieser nur auf der Autobahn und nur bei einem erkannten Stau vom Fahrer aktiviert werden kann sowie nach der Auflösung des Staus die Übergabe der Fahrfunktion zurück an den Fahrer erfolgt. Die Einschaltbedingungen sind die Erkennung einer Autobahn, eine Geschwindigkeit unterhalb von 60 km/h sowie die Erkennung eines Fahrzeugs vor dem eigenen Fahrzeug.

Im Vergleich zum Design konventioneller Systeme wird für hochautomatisierte Fahrfunktionen die „Use-Case“-Definition im Rahmen der Kundenanforderungen auf jeder Dekompositionsebene mittels einer FEV eigenen MBSE-Methode um eine

Enterprise Architect Use-Case-Diagramm



② Use-Case-Diagramm und Szenarien-Zuordnungsdiagramm mit der Verknüpfung von Use Case, Features und Akteuren

Szenarien-Spezifikation erweitert und jede funktionale Anforderung mit relevanten Szenarien verknüpft. Durch die klare und formale Nachverfolgbarkeit zwischen einzelnen Anforderungen und möglichen Betriebszuständen ergibt sich ein hohes Automatisierungspotential – z.B. bei Datenbankanalysen und Testfallausleitung. Außerdem sind Testumfänge eindeutig und die Gesamttestumfänge werden im Vergleich zu einer ODD-Betrachtung auf Gesamtfunktionslevel optimiert und reduziert.

Die Modellierung erfolgt im weiteren Verlauf unter möglicher Nutzung der enthaltenen Informationen (Straße, Verkehrsinfrastruktur, zeitlich begrenzte Modifikationen wie z.B. Baustellenschilder, bewegliche Objekte, Umgebungsvariablen wie z.B. Wetter sowie zu Datenflüssen und Kommunikationsinformationen). So können einerseits Komponentenanforderungen wie beispielsweise Performance-Anforderungen an die Sensorik gestellt werden. Andererseits können mit Hilfe einer Automation Testfälle für verschiedene Simulationsumgebungen generiert werden.

Dies reduziert die Verifikations- und Validierungsumfänge immens, da auch größer aufgespannte Szenarien-Räume, welche bei der Simulation in Cloud-Umgebungen und bei MiL- und SiL-Tests mit breit gefächerten Variationen im Rahmen von „Corner-Case“-Simulationen benötigt werden, durch die geschickte Modellierung von Szenarien mit automatisiert erzeugten Testfällen abgedeckt werden können.

Der weitere Plan zur Verwendung der automatisiert erstellten Test-Cases beinhaltet eine Unterstützung des „OpenSCENARIO“-Formats.<sup>(2)</sup> Nach Abschluss der Modellierung müssen die entsprechenden Use-Cases-Anforderungen zugeordnet werden. Diese können dann mit einem „ALM-Tool“, über welches auch das Life-Cycle-Management, das Testmanagement und das Fehler-

Szenarien-Zuordnungsdiagramm



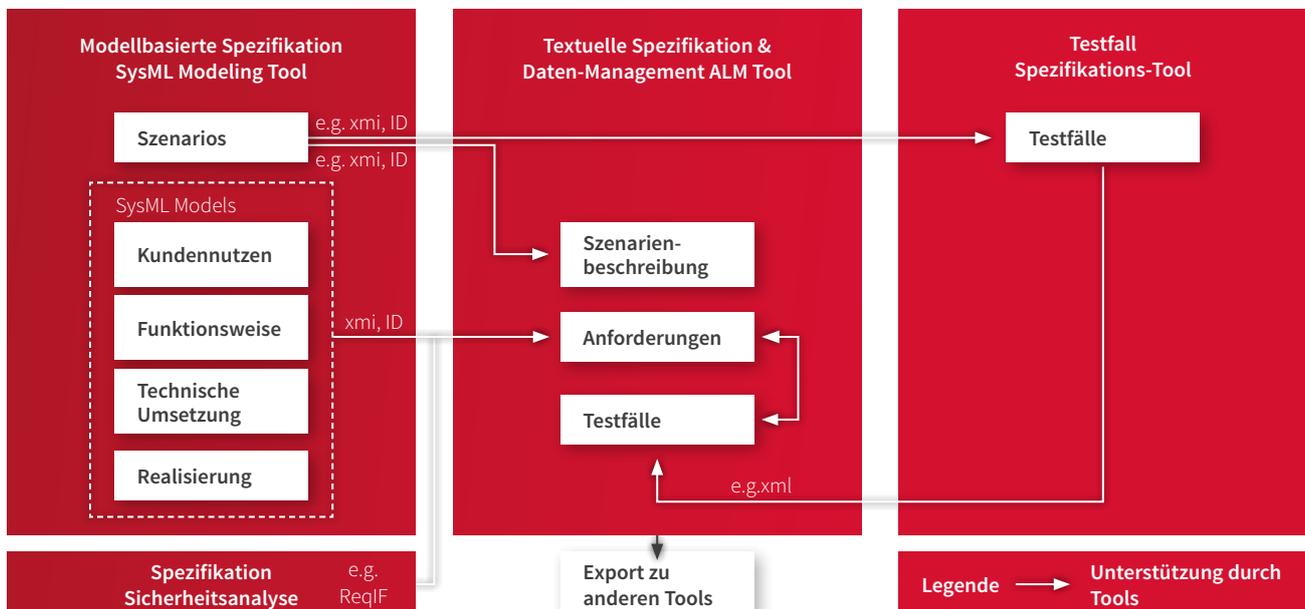
management verwaltet werden, mit den entsprechenden „Use Cases“ verknüpft werden. Es gibt bereits mehrere „ALM Tools“, die mit Schnittstellen zu „Enterprise Architect“ ausgestattet sind. Die Methodik ist unabhängig von der Toolplattform und dem SysML-Modellierungstool für jede beliebige Entwicklung automatisierter Fahrfunktionen anwendbar. Die gesamte Toolkette kann dann entsprechend der Abbildung 3 aufgebaut sein. Der Mehrwert, der sich aus dem Szenarien- und modellbasierten Systems-Engineering-Ansatz ergibt, lässt sich in mehreren Aspekten wiederfinden.

- 1) Die Szenarien beinhalten durch Ihre Verlinkung zu den Use-Cases-Anforderungen, die über den Szenarien-Test abgesichert werden, eine gute Rückverfolgbarkeit.
- 2) Die Szenarien können zum einen reale Fahrsituationen als auch grenzwertige Szenarien („Corner-Cases“) abbilden,

die über Tests in der Realwelt nicht einfach abgedeckt werden können. Diese können anschließend in dedizierten Simulationsumgebungen (HiL, MiL oder SiL) validiert und getestet werden.

- 3) Definierte Szenarien können jederzeit angepasst und in abgeänderter Form wiederum für Testzwecke in den verschiedensten Bereichen der Absicherung der automatisierten Fahrfunktionen verwendet werden.
- 4) Definierte Szenarien können als zentraler Dreh- und Angelpunkt für die gesamte Entwicklung genutzt werden. Die Szenarien-Spezifikation im Rahmen von MBSE ermöglicht die Verknüpfung mit definierten Anforderungen, Tests sowie erfassten Testdaten und somit in Zukunft den Nachweis der Testabdeckung für SOTIF innerhalb des Entwicklungszyklus.

### Schematische Darstellung einer möglichen Toolkette



③ Mögliche generische Toolchain zur Unterstützung des Szenarien- und Modellbasierten Systems-Engineering-Prozesses bis hin zum Test

- 5) Die Entwicklung der autonomen Fahrfunktionen kann mit Hilfe der oben beschriebenen Methode in Feature-Teams durchgeführt werden. Das bedeutet, dass mehrere Teams unabhängig voneinander an neuen Funktionen arbeiten und auch Szenarien/Sub-Szenarien anpassen oder einfügen können, ohne dass die Basis-Szenarien geändert werden müssen.

Im Rahmen des „L3Pilot“-Forschungsprojekts<sup>(3)</sup> aus dem EU Forschungsrahmen „Horizon 2020“ und den EU Vorgängerprojekten „euroFOT“<sup>(4)</sup> sowie „Adaptive“<sup>(5)</sup> wurden bereits die Themen „Use-Cases“ und „Szenarios“ als zentral für die Systementwicklung im Bereich der Fahrzeugautomatisierung erkannt.

#### Von

Elmar Börner · boerner@fev.com  
 Dr. Thomas Hülshorst · huelshorst@fev.com  
 Sebastien Christiaens · christiaens@fev.com

#### Quellen:

- (1) [www.pegasusprojekt.de](http://www.pegasusprojekt.de);
- (2) Vires Simulationstechnologie GmbH, 2020
- (3) L3Pilot Consortium ([www.l3pilot.eu](http://www.l3pilot.eu)), 2017
- (4) EuroFOT ([www.euroFOT-ip.eu](http://www.euroFOT-ip.eu)), 2020
- (5) Adaptive ([www.adaptive-ip.eu](http://www.adaptive-ip.eu)), 2020

## SOFTWARE

## WANDEL DER HERAUSFORDERUNGEN IN DER AUTOMOBILEN SOFTWAREENTWICKLUNG

Seit fast zwei Jahrzehnten wird bei FEV Software entwickelt, die sich in verschiedenartigen Steuergeräten zahlreicher Automobilhersteller wiederfindet. Der Bedarf ist bis heute hoch und wächst stetig. Moderne Fahrzeuge verfügen über zahlreiche Steuergeräte, in denen Fahrzeugfunktionen in Form von Software realisiert werden. Die Anzahl und Komplexität der Softwarefunktionen nimmt stetig zu – nicht zuletzt durch eine zunehmende Anzahl an Fahrerassistenzfunktionen und weitere Stufen des automatisierten und autonomen Fahrens. Bis dato gängige elektrische und elektronische (E/E-) Architekturen stoßen an ihre Grenzen und somit geht der Trend zu zentralisierten Systemen mit leistungsstarken Steuer-einheiten, welche vermehrt virtualisiert sind. Neben altbekannten Embedded-Control-Units gelangen auf diese Weise zusätzlich IT-Systemarchitekturen in die Fahrzeuge. Durch die Vernetzung der Fahrzeuge mit der Außenwelt erweitert sich auch die Vielfalt des Anforderungsspektrums an die entsprechenden Kompetenzen in der Softwareentwicklung.

# 1.000+

FUNKTIONSENTWICKLUNGS-  
UND SOFTWARE-INGENIEURE  
WELTWEIT

■ Zentraleuropa	60 %
■ Ost-Europa	20 %
■ Asien	10 %
■ Nordamerika	10 %

SOFTWARECENTER

KHOURIBGA (MAROKKO)

SOFTWARECENTER

CHENNAI (INDIEN)

Unsere Softwarethemen:

- Modellbasierte Softwareentwicklung
- Software Coding
- Software Integration
- Test von Funktionsmodellen
- Hardware-in-the-Loop Testing



## HIGH- END-

TESTSTRECKEN

Von

Dr. Marco Jentges  
jentges@fev.com  
Dr. Thomas Hülshorst  
huelshorst@fev.com

**S**chon zu Beginn des neuen Jahrtausends hat FEV bei der automobilen Softwareentwicklung in vielen Projekten auf globale Entwicklungsteams gesetzt. Zunächst waren die Entwicklungsstandorte in Auburn Hills (FEV North America) und in Aachen (FEV Europe) von zentraler Bedeutung. Im Laufe der Jahre entstanden weitere „Software Engineering Center“, beispielsweise in Krakau (FEV Polen), Istanbul (FEV Türkei), Timisoara (FEV Rumänien), Shanghai (FEV China) sowie Chennai oder Pune (FEV Indien).

Die Besonderheit dieses globalen Netzwerks besteht in einer sehr vertrauten Zusammenarbeit der einzelnen Standorte. So werden untereinander Experten temporär entsandt und ein Know-how-Transfer der Entwicklungsstandorte sichergestellt. Die einzelnen Entwicklungsteams stehen im Rahmen der globalen Produktlinie „Software Engineering“ und natürlich auch durch die alltägliche Projektarbeit in engem Austausch miteinander. So wurde eine Kultur der chancengetriebenen, projektorientierten Weiterentwicklung der Kompetenzen der einzelnen Standorte gefördert, die gleichzeitig weltweit abgestimmt und koordiniert wird. Auf diese Weise entstehen aus den Entwicklungszentren echte Kompetenzzentren mit spezifischen, technischen Ausrichtungen. Die FEV Group verfügt mittlerweile über mehr als 400 hochqualifizierte Softwareentwickler, die an mehr als einem Dutzend Standorten tätig sind – Tendenz weiter steigend.

## Kunde im Fokus

FEVs Kunden stehen im Mittelpunkt des Handelns und profitieren in mehrfacher Hinsicht von diesem globalen Kooperationsmodell: Zum einen ist FEV in direkter Nähe zum Kunden, zum anderen können die Softwaredienstleistungen von FEV durch einen entsprechenden Mix zu attraktiven, wettbewerbsfähigen Konditionen angeboten werden. Darüber hinaus erlaubt es die globale Ausrichtung des Softwareteams, technische Experten bei neuen und zukunftsorientierten Themen in solche Projekte einzubinden, wo aktueller Bedarf besteht – dies wiederum spart Zeit und Kosten. Zusätzlich werden in den Bereichen Cybersecurity, Functional Safety Software, Embedded Virtualization kontinuierlich weltweit neue Mitarbeiter rekrutiert.

## Der traditionell technisierte Standort Indien

Die Software Center in Indien wurden 2014 in Chennai an der Ostküste Indiens und in Pune im Westen des Landes errichtet. Seither erfahren die Standorte ein stetiges Wachstum. Mittlerweile arbeiten mehr als 100 Experten dort an lokalen aber auch global ausgerichteten Projekten. Durch die ganzheitliche Abdeckung von Engineering-, Entwicklungs- und Validierungsarbeiten kann FEV in Chennai Softwareumfänge aus einer Hand anbieten. Die

Mitarbeiter vor Ort verfügen über vielfältige Expertise auf den Gebieten der Softwareentwicklung und -integration, der funktionalen Sicherheit und Cybersecurity, E/E-Architekturen sowie Know-how im Bereich der Fahrerassistenzsysteme und dem teilautonomen Fahren. Die globale Produktlinie „Infotainment“ wird darüber hinaus von Indien aus gesteuert.

Zusammen mit Bangalore und Hyderabad sind Pune und Chennai als wichtige Zentren für die Softwareentwicklung in Indien hervorgetreten, an denen zahlreiche namhafte IT-Firmen und Softwareunternehmen vertreten sind – mit entsprechend hoher Anzahl qualifizierter Softwareentwickler. Damit leistet FEV Indien einen wichtigen Beitrag auch in der globalen Zusammenarbeit mit anderen FEV Standorten bei gleichzeitig äußerst wettbewerbsfähigen Kosten, zu denen Software unter hohen Qualitätsanforderungen entwickelt werden kann.



## Der aufstrebende Standort Marokko

Insbesondere französische Automobilhersteller und -zulieferer verlagern seit einigen Jahren ihre Entwicklungskapazitäten nach Nordafrika. Neben vorteilhaften Kostenstrukturen findet man in diesen Regionen sehr gut ausgebildete Ingenieure, die zusätzlich oftmals französisch- und englischsprachig sind.

Im Jahr 2018 wurde der Standort FEV Marokko durch die Eröffnung eines Büros in Casablanca gegründet. Inzwischen befindet sich ein hochmodernes technisches Entwicklungszentrum am Standort Khouribga im Aufbau. Hinzu kommt das erste Automobilentwicklungs- und -testzentrum in Afrika, welches FEV und sein Joint-Venture-Partner UTAC CERAM in diesem Jahr im marokkanischen Oued Zem eröffnen werden. Die Anlage wird ein breites Spektrum anbieten, u.a. Entwicklung, Validierung und Prüfung von Fahrerassistenzsystemen oder Ausrolltests auf einer 4 Kilometer langen Strecke.

Neben den Entwicklungsschwerpunkten im Bereich der Applikation von Antriebssträngen und dem funktionalen sowie mechanischen Design werden künftig auch Kapazitäten im Bereich der Softwareentwicklung angeboten. Der Schwerpunkt der Softwareumfänge am Standort Marokko liegt im Bereich der modellbasierten Softwareentwicklung, bei der u.a. Matlab/Simulink und Instrumente zur automatischen Codegenerierung zum Einsatz kommen. Das Testen von Funktionsmodellen auf Modulebene, wie nach der Integration in das jeweilige Steuergerät an einem Hardware-in-the-Loop-Prüfstand, sowie die Dokumentation der jeweiligen Funktionen sind weitere Leistungspakete, die zukünftig verstärkt am nordafrikanischen Standort von FEV durchgeführt werden.

## SOFTWARE

# SOFTWAREBASIERTE FUNKTIONEN – ENTSCHEIDENDE DESIGNFAKTOREN IN DER AUTOMOBILWELT



SKALIERBAR



SICHER



FORTSCHRITTLICH

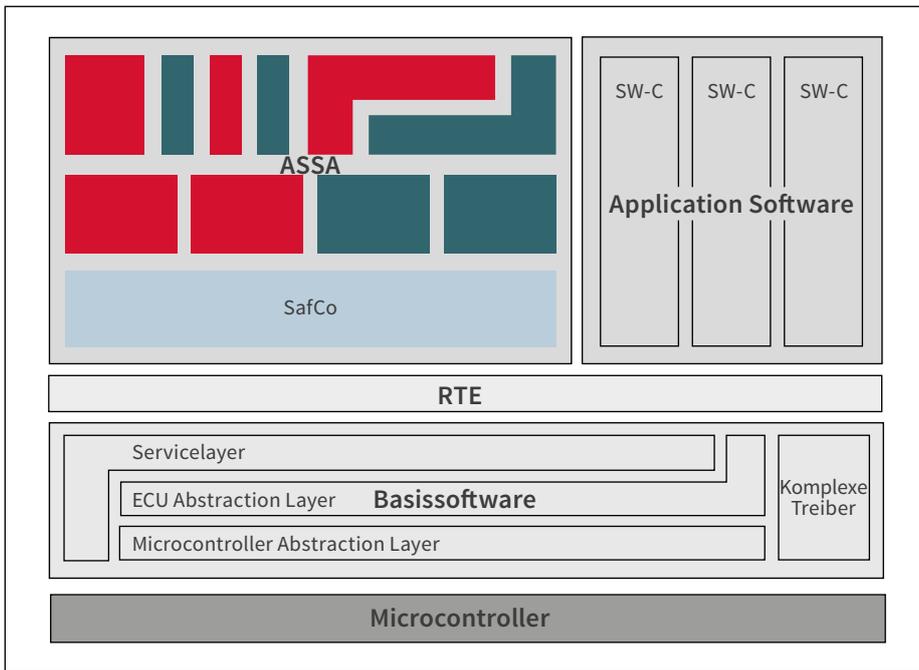


**S**oftware ist seit über 30 Jahren ein grundlegender Bestandteil moderner Fahrzeuge und setzt in vielen Fällen sicherheitskritische Funktionen um. Die Norm ISO 26262 ist ein Beispiel dafür, dass die Automobilbranche Entwicklungs- und Qualitätsstandards etabliert und umgesetzt hat, die heute dafür sorgen, dass sicherheitskritische Software die erforderlichen Qualitätsziele erfüllt.

Die Entwicklung von Automobilsoftware befindet sich aufgrund der zunehmenden funktionalen und technischen Komplexität derzeit in einem grundlegenden Wandel – softwarebasierte Funktionen werden zu immer wichtigeren Fahrzeugmerkmalen. Gleichzeitig wird eine deutlich kürzere Zeit bis zur Markteinführung angestrebt, was wiederum den wirtschaftlichen Druck für Softwarelieferanten erhöht.

All diese Tendenzen sind im Bereich der sicherheitskritischen Software noch stärker zu spüren, da die hier geltenden Standards und Entwicklungsprozesse noch gewichtiger und strikter sind. Somit ist die Umsetzung von Effizienzverbesserungen, welche die Qualität der Sicherheitssoftware nicht gefährden, in diesem Bereich wichtiger als je zuvor.

Als führender Anbieter von Engineering-Dienstleistungen mit umfassender Erfahrung bei Antriebskomponenten und bei der Entwicklung von Automobilsoftware hat FEV einen zweiteiligen Ansatz zur Steigerung der Effizienz und Reduzierung der Entwicklungszeiten seiner sicherheitskritischen Software entwickelt: Ein Eckpfeiler der Strategie von FEV ist die Einführung einer generischen Architektur für Sicherheitssoftware, mit deren Hilfe Synergien durch die einfachere Wiederverwendbarkeit von Software-Einheiten genutzt werden können. Der zweite Eckpfeiler der Strategie von FEV zielt auf die Straffung des Entwicklungsprozesses von sicherheitskritischer Software ab, ohne dass dabei die Einhaltung von Sicherheitsstandards, wie ISO 26262, gefährdet wird.



① Eine ASSA-basierte sicherheitskritische Software, die in die Software eines AUTOSAR-Steuergeräts integriert ist. Der Safety Coordinator fasst alle Sicherheitssoftwarekomponenten zusammen, die wiederverwendbare und anwendungsspezifische Komponenten enthalten.

■ Wiederverwendbare/generische Sicherheitssoftwarekomponenten    
 ■ Anwendungsspezifische Sicherheitssoftwarekomponenten    
 ■ Safety Coordinator

### Automotive Safety Software Architecture – fortschrittlich, skalierbar, sicher

Die von FEV vorgeschlagene generische Architektur für Sicherheitssoftware soll die Übertragbarkeit steigern, indem die Abhängigkeit zwischen Sicherheitssoftware und Hardware entkoppelt wird. Die „Automotive Safety Software Architecture“ (ASSA) von FEV besteht aus drei Arten von strukturellen Elementen: (1) dem Safety Coordinator, (2) wiederverwendbaren/generischen Sicherheitssoftwarekomponenten und (3) anwendungsspezifischen Sicherheitssoftwarekomponenten (vgl. Abbildung 1).

Das Design aller ASSA-Elemente basiert auf dem bekannten Konzept der „komponentenbasierten Softwareentwicklung“. Jede in der Architektur definierte Softwarekomponente spiegelt daher die physischen Komponenten des zugrunde liegenden Systems wider, z. B. einer physischen Antriebskomponente. Wo das nicht möglich ist, werden Softwarekomponenten gemäß ihrer logischen Struktur entwickelt. Diese zumeist physikbasierte Strukturierung stellt eine hohe Kohärenz der Funktionalität in einer Komponente sicher und ist ein bewährtes Konzept, das bei dem internen Software-Architekturstandard PERSIST (Powertrain control architecture Enabling Reusable Software development for Intelligent System Tailoring) von FEV und bei AUTOSAR häufig eingesetzt wird.



### Die drei wichtigsten Eckpfeiler von ASSA

Der Safety Coordinator (SafCo) ist das Kernelement der ASSA. Er koordiniert und fasst alle Sicherheitssoftwarekomponenten zusammen und sorgt für deren Aufruf mithilfe seines internen Schedulers. Zudem wird die gesamte Kommunikation von und zur AUTOSAR-Laufzeitumgebung (Runtime Environment, RTE) durch den SafCo geleitet. Der ASSA-Codegenerator erzeugt mittels parametrisierter Codeerzeugung den Quellcode für den SafCo anhand der Liste der Sicherheitssoftwarekomponenten und ausgewählten Konfigurationen.



Wiederverwendbare/generische Sicherheitssoftwarekomponenten sind Komponenten, die in verschiedenen Antriebsanwendungen frei eingesetzt werden können. Sie sind darauf ausgelegt, ihre Funktion effizient zu erbringen und gleichzeitig einfach, wartbar und konfigurierbar zu sein. Um dieses Ziel zu erreichen, sind standardisierte Anforderungen und Schnittstellendefinitionen die wichtigsten Voraussetzungen. Da die effiziente Handhabung von Softwarevarianten erheblich zur Wiederverwendbarkeit und Übertragbarkeit beiträgt, wird ein featurebasierter Ansatz für das Variantenmanagement verwendet. Diese wiederverwendbaren Softwarekomponenten werden für einen schnelleren Einsatz und zur Reduzierung der Entwicklungskosten mit einer Toolkette bereitgestellt, welche

die ausgewählte Konfiguration validieren und Quellcode mittels parametrisierter Codeerzeugung automatisch erzeugen kann (Abbildung 2).



Anwendungsspezifische Sicherheitssoftwarekomponenten können in die Kategorien antriebsspezifische und produktspezifische Softwarekomponenten eingeordnet werden.

Antriebsspezifische Sicherheitssoftwarekomponenten sind Softwarekomponenten, die in einem bestimmten Antriebsselement wiederverwendet werden können. Produktspezifische Softwarekomponenten hingegen lassen sich nicht wiederverwenden und dienen nur einem bestimmten Zweck. Diese Komponenten sollen ausschließlich eine spezifische Funktion für eine bestimmte Systemhardware oder einen vorgegebenen Einsatzfall erfüllen. Anwendungsspezifische Softwarekomponenten können mit einem beliebigen Implementierungsansatz entwickelt werden, dies schließt auch die modellbasierte Softwareentwicklung ein.

Da Kundenbedürfnisse stark variieren können, ist die ASSA nicht auf AUTOSAR-basierte Umgebungen beschränkt. Die ASSA kann zur Unterstützung der Entwicklung für vorhandene Nicht-AUTOSAR-Steuergeräte auch für den Betrieb und Einsatz in Nicht-AUTOSAR-Systemen konfiguriert werden.

### Automotive Safety Software Development Process

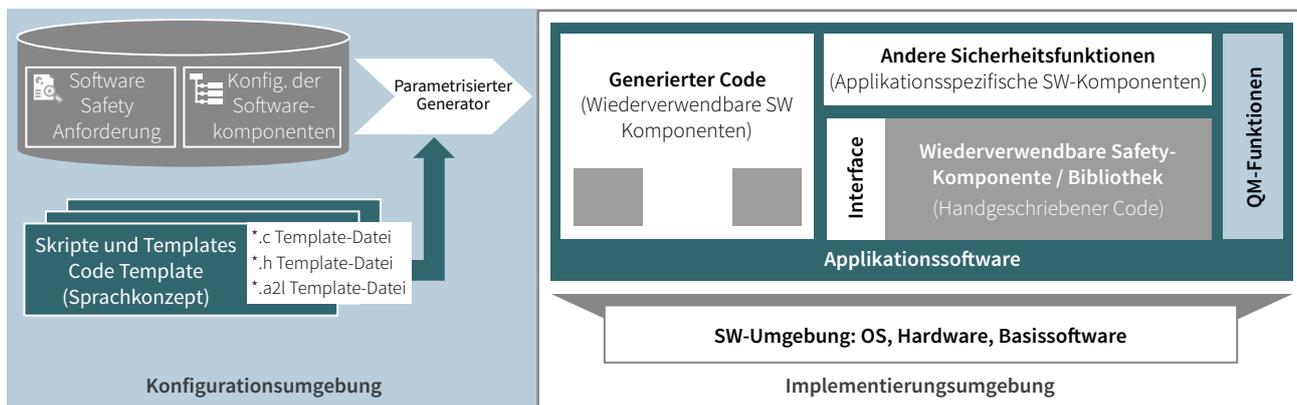
Der zweite Eckpfeiler der FEV-Strategie zur Steigerung der Effizienz und Flexibilität bei der Entwicklung von Sicherheitssoftware ist die Einführung eines maßgeschneiderten sicherheitskritischen Prozesses, der moderne Software-Entwicklungsmethoden nutzt. Dieser Prozess nennt sich „Automotive Safety Software Development Process“ (ASSDP, Entwicklungsprozess für automobiler Sicherheitssoftware) und soll einen reibungslosen und effizienten Übergang zwischen verschiedenen Entwicklungsphasen des Sicherheitssoftware-Lebenszyklus gewährleisten, ohne die in der

ISO 26262 aufgeführten Anforderungen zu vernachlässigen. Der ASSDP soll das Komplexitätsmanagement bei der Entwicklung von Sicherheitssoftware verbessern und straffen, indem iterations- und inkrement-basierte Software-Entwicklungstechniken stärker betont werden.

Der Ansatz der ISO 26262 zur Entwicklung von Sicherheitssoftware setzt das V-Modell zur Strukturierung der Entwicklungsphasen ein und bietet gut definierte Abhängigkeiten und Rückverfolgbarkeit zwischen den einzelnen Phasen. In der Regel wird das V-Modell mit einem wasserfallähnlichen Ansatz implementiert, bei dem die unterschiedlichen Entwicklungsphasen linear und strikt sequenziell gehandhabt werden. Ein derartiger Ansatz eignet sich am besten bei Umgebungen, für die Problembeschreibung und Anforderungen von Anfang an vollständig und eindeutig vorliegen. Im Zeitalter aufkommender komplexer und leistungsstarker eingebetteter Systeme kommt es bei der Entwicklung von Automobilsoftware jedoch immer häufiger vor, dass man während



② *Parametrisierte Codeerzeugung für wiederverwendbare Softwarekomponenten. Diese werden mithilfe einer angepassten Toolkette entwickelt, welche die Erstellung der Konfiguration, deren Validierung sowie die parametrisierte Codeerzeugung unterstützt.*



der Projektdurchführung mit unvollständigen Informationen oder grundlegenden Updates der Umgebungsbedingungen, z. B. Hardware-Updates, konfrontiert ist. Auch in Projektstadien mit fortgeschrittener Implementierung sowie Verifikation und Validierung, ist es noch immer möglich und sogar erforderlich, agile Methoden in einzelnen Phasen der Sicherheitssoftwareentwicklung anzuwenden, um die Softwarequalität kontinuierlich zu verbessern sowie Zeit- und Kostenziele zu erfüllen.

FEV strebt daher einen Hybridansatz für die Sicherheitssoftwareentwicklung an. Obwohl der ASSDP auf den Anforderungen von ISO 26262-6:2018 aufbaut, weicht er von dem häufig eingesetzten wasserfallbasierten Softwareentwicklungsansatz ab. Der ASSDP nutzt zur Realisierung von Flexibilität und Reduktion der Entwicklungszeit einen hybriden Prozessansatz, bei dem die Hauptentwicklung in zwei getrennte Phasen unterteilt ist: (1) eine Softwareentwicklungsphase mit V-Zyklus und (2) eine agile Softwareentwicklungsphase. Abbildung 3 zeigt eine Übersicht über den ASSDP, einschließlich seiner sequenziellen und stärker iterations- und inkrementbasierten agilen Entwicklungsphasen.

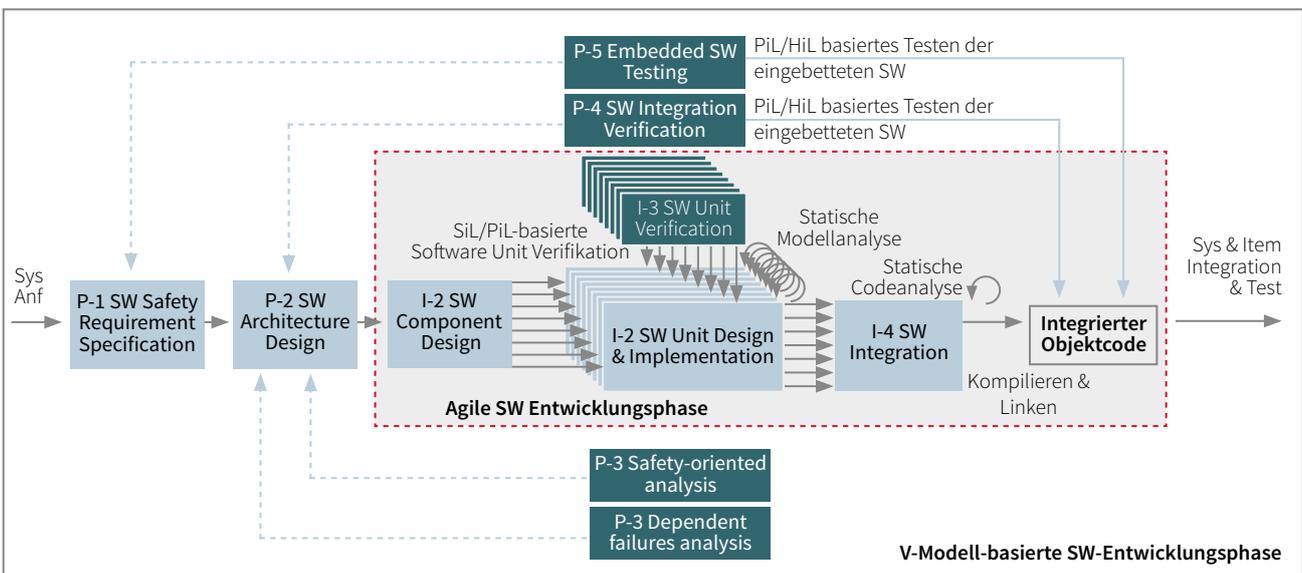
### Kernstück des ASSDP sind agile Best Practices

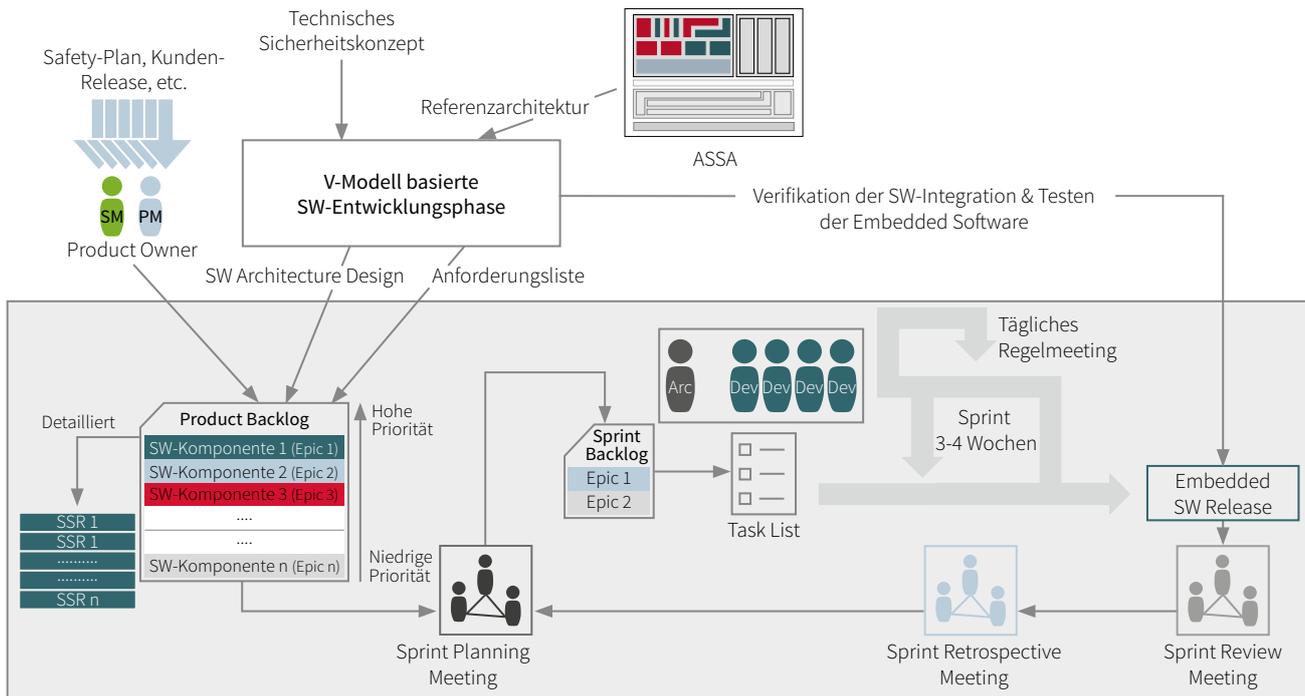
Die auf dem V-Zyklus basierte Softwareentwicklungsphase des ASSDP umfasst hauptsächlich die Design-, Analyse- und Verifizierungsschritte der Entwicklung (vgl. Abbildung 3). Die Spezifikation von Softwaresicherheitsanforderungen (P-1) wird ausgehend von den Systemanforderungen durchgeführt, gefolgt von dem Entwurf der Software-Architektur (P-2). Nach dem Abschluss von P-2 folgt die Analyse der Software-Architektur (P-3), welche sicherheitsgerichtete Analysen der Software-Architektur und die Dependent Failure Analysis (DFA) beinhaltet. Die Verifikation

der Software-Integration (P-4) folgt auf den Schritt I-4 Software Integration, der Teil der agilen Software-Entwicklungsphase des ASSDP ist. Der Test der eingebetteten Software (P-5) ist der letzte Prozessschritt und soll nachweisen, dass die integrierte, eingebettete Software bei der Ausführung in der Zielumgebung alle Anforderungen erfüllt. Natürlich weisen P-4 und P-5 auch nach, dass die integrierte Software keine unerwünschten Funktionen oder Eigenschaften mit Blick auf die funktionale Sicherheit aufweist.

Die agilen Prozessschritte bilden das Kernstück des ASSDP und decken die Aktivitäten des Designs der Softwarekomponenten (I-1), Design und Implementierung der Software Units (I-2), Verifikation der Software-Unit (I-3) sowie Integration der Software (I-4) ab (Abbildung 3) ab. Die Prozessschritte zeichnen sich durch kurze und wiederholte Iterationen aus: Jede Entwicklungsiteration dauert in der Regel drei bis vier Wochen. Im Gegensatz zur V-modell-/wasserfallbasierten Vorgehensweise wird die Struktur des Systems und nicht dessen Details zu Beginn eines agilen Prozesses festgelegt, was das frühe Design in agilen Prozessen vereinfacht. Zudem sind die Implementierung (und damit auch die Tests) iterativ und inkrementell, während sie in den V-modell-/wasserfallbasierten Prozessen stärker monolithische Schritte darstellen.

③ Übersicht zum ASSDP. Wasserfall-basierte und agile Phasen überlappen sich, damit iterations- und inkrementbasierte Phasen bei der Entwicklung sicherheitskritischer Software eingeführt werden können. Die unterschiedlichen Prozessschritte sind für jede Phase mit ihrer logischen Sequenz dargestellt.



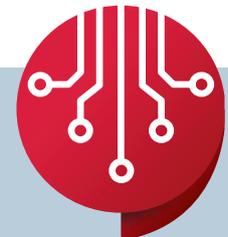


④ *Agile Phase des ASSDP. Kurze und wiederholte Iterationen sind die wichtigste Eigenschaft dieser Phase, die in der Regel jeweils drei bis vier Wochen dauert. Hier werden bekannte Organisationselemente aus der agilen Softwareentwicklung verwendet.*

Auf der Grundlage der Beschreibung der Softwarearchitektur aus dem Schritt P-2 Software Architecture Design erstellen der Product Owner und der Safety Manager den Product Backlog, der eine Liste von Epics und User Storys beinhaltet. Die Priorität der User Stories im Product Backlog hängt von der Projekt-Roadmap sowie den benötigten sicherheitskritischen Ergebnissen ab. Mit Blick auf den ASSDP werden alle Sicherheitssoftwarekomponenten im Product Backlog als Epic behandelt, wohingegen sich alle in einem Epic zugewiesenen User Storys auf Software Units einer bestimmten Sicherheitssoftwarekomponente beziehen. Je nach Größe und Komplexität können ein oder viele Epics während des Sprint Plannings ausgewählt werden. Jeder Sprint wird dann weiter in die vier Aktivitätsphasen, also I-1 bis I-4, unterteilt. Am Ende jedes Sprints wird ein Sprint Review durchgeführt, bei dem alle Artefakte aus einem bestimmten Sprint vom Safety Manager und Product Owner mit den Anforderungen von ISO 26262 abgeglichen und überprüft werden. Auf diesen Schritt folgt eine Sprint Retrospective und anschließend die nächsten Sprints (Abbildung 4).

Der ASSDP wird von zusätzlichen Supportprozessen und Tool-support begleitet. Continuous Integration (CI, kontinuierliche Integration) ist ein wichtiges Tool, das eine möglichst effiziente Durchführung der agilen Entwicklungsschritte ermöglicht. Aus

diesem Grund pflegt FEV eine CI-Umgebung, die die Entwicklungsaktivitäten unterstützt. Diese umfassen die Ausführung von Verifikationsaktivitäten auf unterschiedlichen Ebenen und mit unterschiedlichen Methoden, die Coderzeugung, den SW-Build für das Zielsystem sowie die Software-Dokumentation.



## Fazit

Sowohl die Sicherheitsarchitektur ASSA als auch der Entwicklungsprozess für Sicherheitssoftware ASSDP sind wichtige Eckpfeiler zur Steigerung der Effizienz und Reduktion der Entwicklungszeit bei der Entwicklung von Sicherheitssoftware, ohne dass dabei Kompromisse bei den Qualitätsanforderungen eingegangen werden.

### Von

Vinod Prabhu · prabhu@fev.com  
 Dr. Günter C. Keßler · kessler@fev.com  
 Dr. Marco Jentges · jentges@fev.com

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

# ENTER

# THE NEXT LEVEL



 /companies/fevgmbh

 /showcase/fev-career



## **MOBILITÄT VERBINDET MENSCHEN. MENSCHEN GESTALTEN MOBILITÄT.**

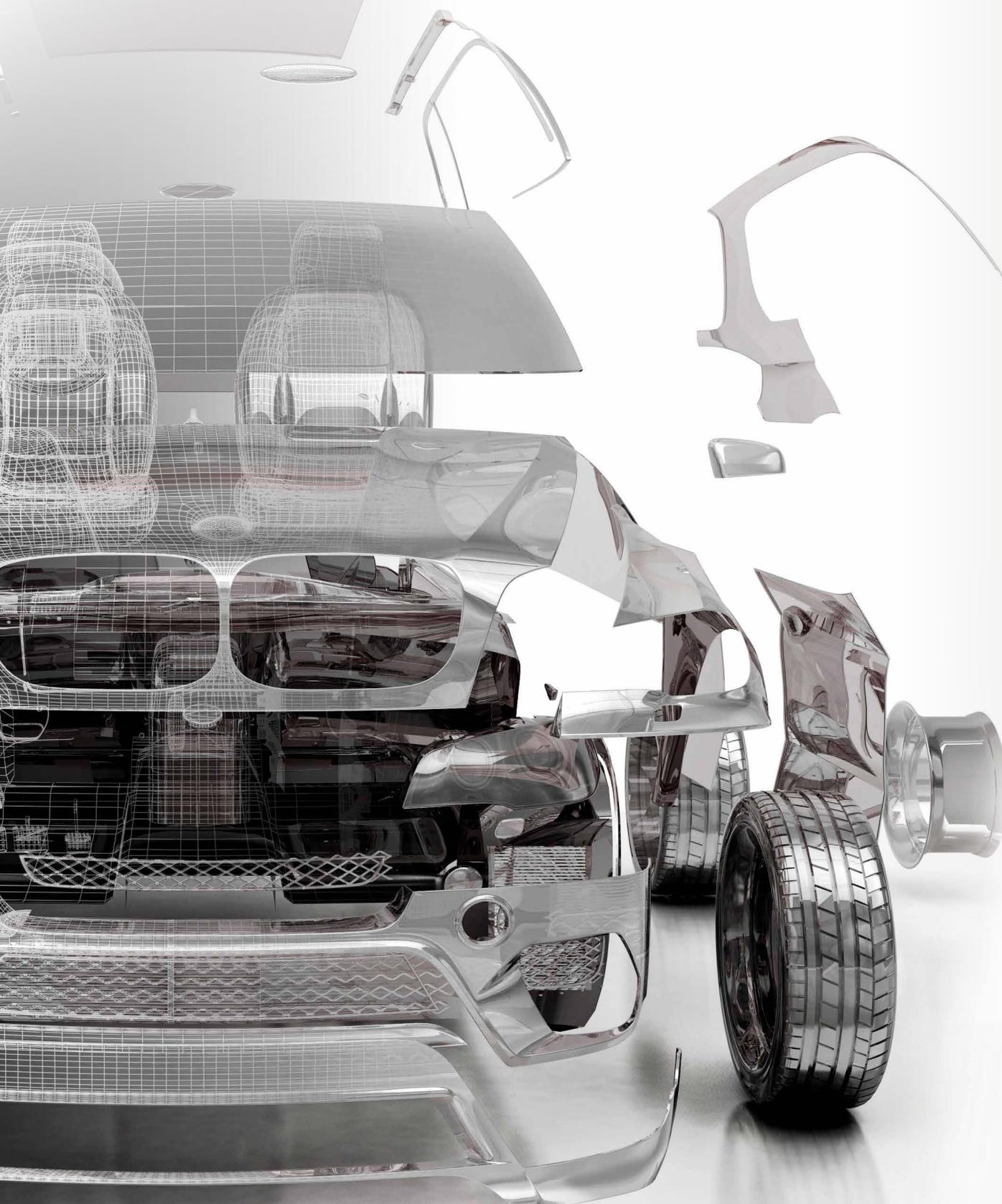
Mit über 6.300 Mitarbeitern weltweit entwickeln wir zukunftsweisende und effiziente Antriebssysteme, wir vernetzen Fahrzeuge miteinander und mit ihrer Umwelt und arbeiten daran, unser Leben mit intelligenten Systemen sicherer zu machen. Dazu brauchen wir die richtigen Leute am richtigen Ort. Menschen, 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](http://www.fev.com/karriere)

## GESAMTFAHRZEUGENTWICKLUNG

GEBALLTE KOMPETENZ  
UNTER EINEM DACH



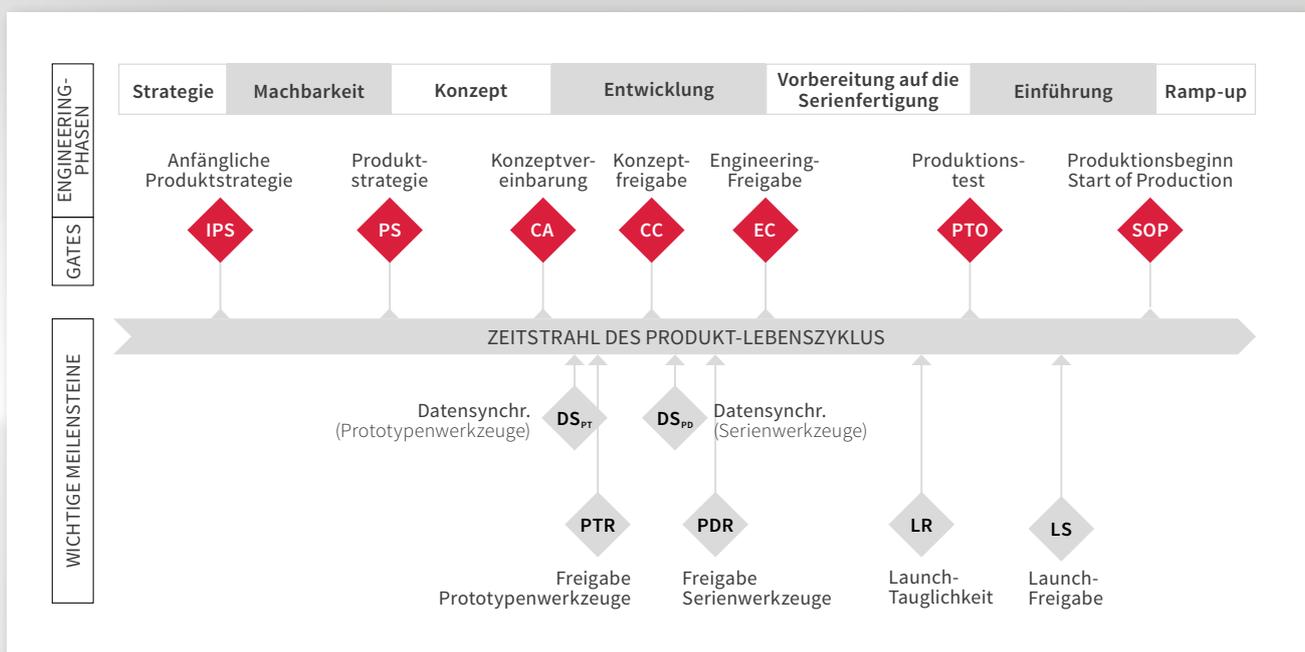
Der Fahrzeugentwicklungsprozess ist heute komplexer denn je und erfordert eine Vielzahl bereichsübergreifender Interaktionen und die Fähigkeit, Ressourcen über verschiedene Disziplinen hinweg zu integrieren. FEV begegnet dieser Herausforderung mit zuverlässigen Systemen und Expertenteams, die über jahrzehntelange Erfahrung im Management komplexer Projekte wie Antriebsstrangintegration, Attributentwicklung und allumfassenden Fahrzeug-Engineerings verfügen. Diese Expertise erstreckt sich sowohl auf verbrennungsmotorische als auch auf elektrifizierte Antriebsstränge und deckt praktisch alle Formen der Mobilität ab. Kostenplanung, Lieferantenbeschaffung, Qualitätsvorausplanung und Freigabemanagement sind nur einige der vielen Kompetenzen, die im FEV-Portfolio enthalten sind. FEV entwickelt sowohl Hardware- als auch Softwarelösungen und validiert Produkte sowohl mit virtuellen als auch mit testbasierten Methoden. Darüber hinaus setzt das Unternehmen modernste Kommunikationsmittel und flexible Teamstrukturen ein, um den Anforderungen der Kunden weltweit gerecht zu werden, und unterstützt diese Programme auf allen Ebenen der Entwicklung in vollem Umfang – vom ersten Konzept bis zur Serienproduktion.

### Der FEV Fahrzeugentwicklungsprozess

Der Bereich der Fahrzeugentwicklung ist ständigen Veränderungen unterworfen und aufgrund einer steigenden Zahl an Innovationen (fortgeschrittene Fahrerassistenzsysteme, HMI, Elektrifizierung, Konnektivität usw.) und der damit verbundenen Komplexität mit ganz neuen Anforderungen konfrontiert. Neue Technologien aus anderen Branchen finden heute so schnell Eingang in die Welt der Fahrzeuge wie noch nie und auch die Bandbreite der Anwendungsgebiete ist größer als je zuvor. Des Weiteren kommen in regelmäßigen Abständen neue Akteure auf den Markt, manche von ihnen mit radikal neuen Vorstellungen von Produkten und Dienstleistungen für Fahrzeuge. Da all dies im FEV Fahrzeugentwicklungsprozess (FDVP, Abbildung 1) Berücksichtigung findet, kann damit sowohl die Produktentwicklung etablierter OEMs als auch jene neuer Start-ups unterstützt werden.

### Ausrichtung des FDVP auf die Prozesse des Kunden

Der Fahrzeugentwicklungsprozess von FEV stützt sich auf jahrzehntelange Erfahrung und fundierte Kenntnis der bewährten Verfahren, die in verschiedenen Branchensegmenten zum Einsatz kommen. Das Rückgrat bildet ein einfacher Basisprozess, um hohe Flexibilität und Anpassung an mögliche Kundenprozesse zu ermöglichen. Um den FDVP besser auf die kundenspezifischen Prozesse anwenden zu können, werden bei Erreichen wichtiger Meilensteine klare Schnittstellenpunkte definiert. So sind übersichtliche und sichere Übergänge vom FDVP zum Kundenprozess (oder andersherum) gewährleistet und FEV kann sich mit Blick auf die jeweiligen Programmziele flexibel einbringen.



① Der FEV Fahrzeugentwicklungsprozess

### Von der Innovation in die Praxis

Aufgrund seiner Geschichte unterhält FEV enge Beziehungen zu Universitäten und nichtakademischen Forschungspartnern auf der ganzen Welt und profitiert dadurch von einem einzigartig frühen Zugang zu neuen Technologien.

Der durch den FDVP-Ansatz vorgegebene Rahmen macht es möglich, Innovationen schnell aus der Forschungsphase in die Fahrzeugentwicklung von Fertigungsprogrammen zu überführen. Ein Beispiel dafür, wie Innovationen mit dem FDVP erfolgreich in die Praxis übertragen werden, sind mittels der Lichtfeldtechnologie erstellte dreidimensionale Darstellungen (3D-Ansichten). Die Anwendungsbandbreite reicht hier von Rückleuchten mit 3D-Effekten und Displays bis hin zu informativen und visuell ansprechenden Projektionen außerhalb des Fahrzeugs (siehe Beispiel in Abbildung 2).

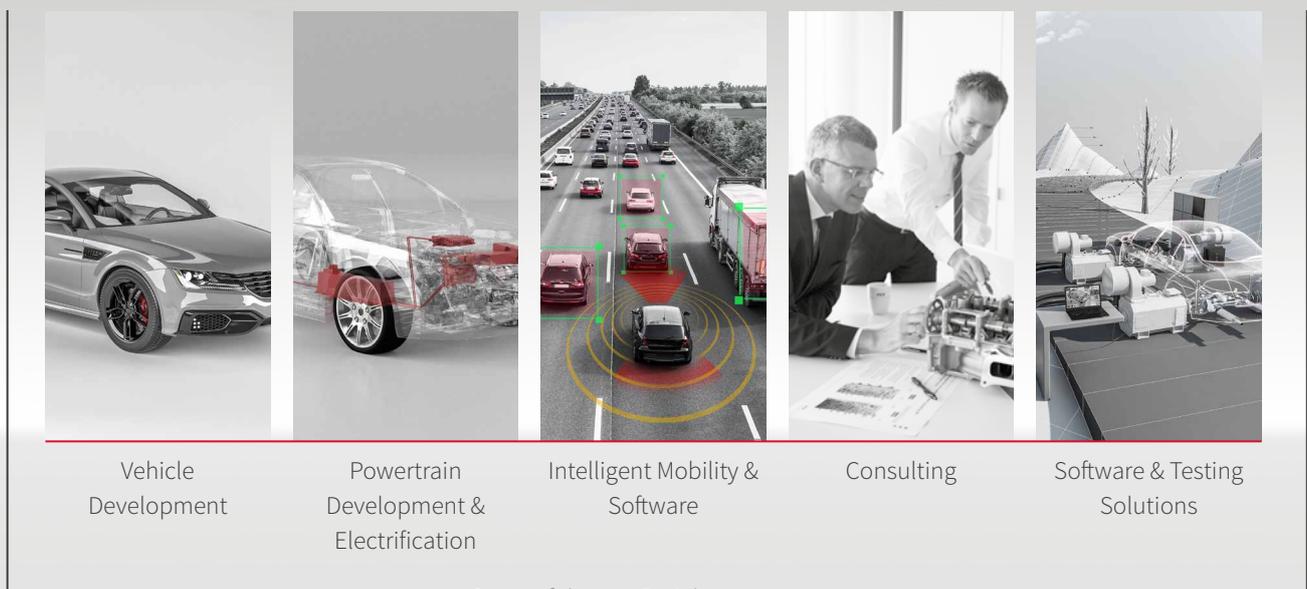


② Lichtfeldtechnologie

### Fahrzeug- und Antriebsstrangentwicklung aus einer Hand

Viele Kunden (insbesondere Start-ups) bevorzugen es, die Entwicklung aller wichtigen Fahrzeugsysteme in ihren Fertigungsprogrammen in die Hände eines einzigen Integrators zu legen. Dank seiner vorteilhaften Ausgangsposition kann FEV Dienstleistungen im Bereich der Gesamtfahrzeugentwicklung anbieten, die gefragt sind, wenn sich Anforderungen

nicht nur auf das Fahrzeug, sondern auch auf die wesentlichen Antriebsstrangkomponenten sowie elektronische Architektur beziehen. Unsere Expertise in all diesen Bereichen ermöglicht es uns, das Produkt als System zu betrachten, dessen verschiedene Eigenschaften weiterentwickelt und optimiert werden können, um herausragende Ergebnisse für den Endkunden sicherzustellen.

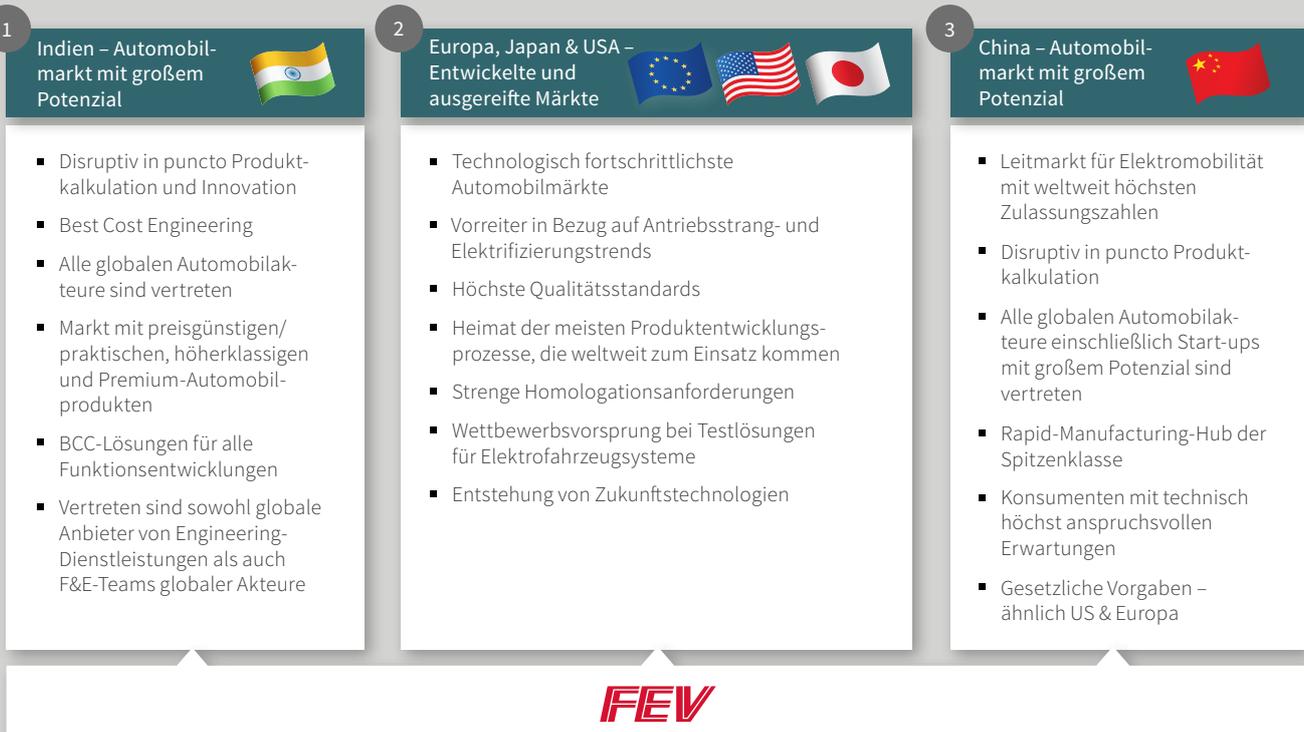


③ Integrierter Entwicklungsprozess von FEV

## Entwicklung weltweit

FEV überzeugt durch globale Expertise im Engineering und bietet seine Dienstleistungen weltweit an. Der FDVP gilt bei FEV als globaler Standard. Die meisten OEMs entwickeln Fahrzeuge für verschiedene Märkte weltweit und greifen auf Methoden und Strukturen zurück, die auch die global verteilten Teams von FEV

nutzen, um erstklassige Produkte bereitstellen zu können. So kann FEV seinen Kunden beispielsweise durch die Einbindung von BCC (Best-Cost-Country)-Lösungen in die Entwicklungsleistungen kosteneffektive Optionen anbieten.



### ④ Vorteile der weltweiten Präsenz von FEV

## Gesamtentwicklung von batterieelektrischen Fahrzeugen mittels integriertem Entwicklungsprozess von FEV

FEV ist ein einzigartig aufgestellter, idealer Partner für Kunden, die die Gesamtentwicklung von batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) in kompetente Hände legen möchten. BEV-Gesamtentwicklungsprogramme profitieren von unserem integrierten Ansatz, in dem Kompetenzen im Bereich der Gesamtfahrzeugentwicklung sowie unsere umfangreiche Expertise in Bezug auf die Entwicklung von Batterien und elektrifizierten Antriebsstrangkomponenten zusammengeführt werden. Wir bieten einen Parallelentwicklungsprozess an, bei dem die BEV-Aggregate, die in einem neuen Fahrzeug verbaut werden sollen, entweder von FEV entwickelt oder dem Produktportfolio des OEM entnommen werden. FEV stellt schlüsselfertige Entwicklungslösungen für Gesamtfahrzeuge bereit oder unterstützt den Kunden in Bezug auf spezifische Aspekte mit seiner Expertise.

Auf Basis von FEVs Know-how in der Entwicklung von Antriebsstrangkomponenten und Fahrzeugstrukturen bietet das Unternehmen einen integrierten Ansatz, der eine parallele Entwicklung von Antriebsstrang und Fahrzeug ermöglicht. Die Vorteile dieses Ansatzes lassen sich anhand des „cell-to-chassis“-Batterieentwicklungsprozesses von FEV gut veranschaulichen. Bei diesem Prozess wird die Batterie als integraler Bestandteil der Rohkarosserie (Body-in-White, BiW) konzipiert, sodass die Fahrzeugstruktur letztlich als Batteriegehäuse fungiert und sowohl dem Insassen- als auch dem Batterieschutz dient.

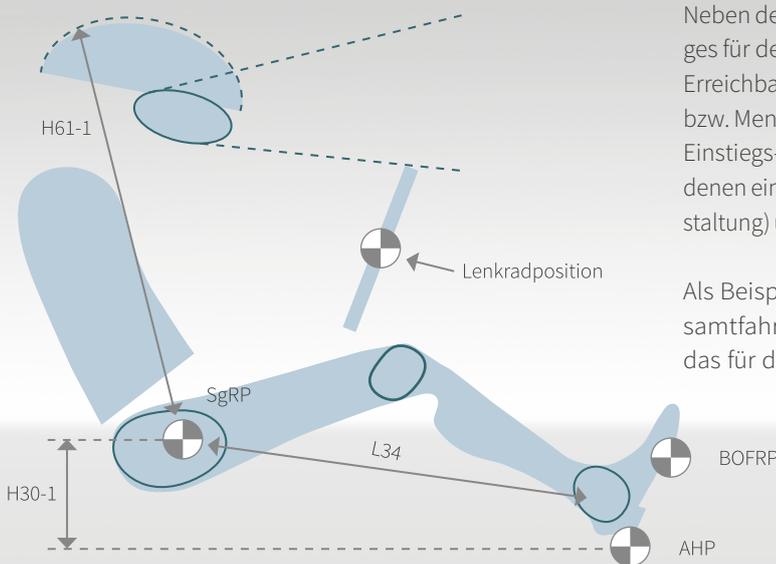
Denkbar sind verschiedene Design-Ebenen, zum Beispiel module-to-pack, cell-to-pack mit oder ohne Fahrzeugboden, module-to-chassis und cell-to-chassis. Die Optimierung des Batteriepack-Designs zielt in erster Linie auf eine höhere Energiedichte, eine geringere Gesamtmasse und Gesamthöhe sowie ein hohes Maß an Flexibilität bezüglich des Fahrzeugportfolios des OEM ab.



**Systemübergreifend sind insbesondere die folgenden Anforderungen zu berücksichtigen**

- Kosten
- Crash- und Steifigkeitsverhalten
- Batteriedichtung
- Sicherheits- und Lastpfad-Konzept der Rohkarosserie
- Fertigung (herstellungs- und montagegerechte sowie auf Gebrauchsfähigkeit ausgelegte Konstruktion)
- Recycling
- Logistikkette und Produktionsstandorte mit Bezug zu UN 38.3
- Homologation der separaten Batterie oder des gesamten Fahrzeugs

Das Team von FEV analysiert das Kundenportfolio und bietet Hilfestellung bei der Definition des optimalen Konzepts, wobei alle relevanten Faktoren berücksichtigt werden, z.B. die Zielmärkte, demografische Merkmale der Kunden, das Produktionsvolumen und die Plattformen. Anschließend wird dem Kunden eine Vielzahl attraktiver Lösungen für neue Batteriekonzepte, Plattformen und Fahrzeugarchitekturen angeboten, von denen bereits zahlreiche Konzepte erfolgreich in Produktion gegangen sind. Dabei liegt FEVs Fokus bei der Entwicklung batterieelektrischer Fahrzeuge stets auf der richtigen Balance zwischen Performance, Kosten und Zeitaufwand.



© Erstellung eines Ergonomie-Konzepts

**Fahrzeuginnenraum und Ergonomie**

Bei der Entwicklung von batterieelektrischen Fahrzeugen stehen neue Gestaltungsmöglichkeiten wie ein kürzerer vorderer Überhang, ein größerer longitudinaler Sitzabstand und optimierte ergonomische Elemente zur Verfügung, die es ermöglichen, noch stärker auf die Kundenbedürfnisse einzugehen. Es bleibt dennoch eine Herausforderung, die bestmögliche Balance zwischen der emotionalen Seite der Fahrzeugentwicklung („Styling“) und der Umsetzung der technischen Anforderungen zu finden, die durch Sicherheitsziele, gesetzliche Vorschriften und ergonomische Erfordernisse in Bezug auf das Package vorgegeben werden. Um im Hinblick auf das Gesamtfahrzeugprodukt ein bestmögliches Ergebnis zu erreichen, bedarf es eines neuartigen Prozesses, der Styling und Engineering zusammenführt. Zu Beginn der Entwicklung eines ergonomischen Packages sind zu einem frühen Zeitpunkt Ziele festzulegen und Anforderungen sowie Abmessungen zu definieren. Als Grundlage dienen hier Benchmark-Werte aus der Datenbank von FEV und Kundenfeedback zu Wettbewerbsfahrzeugen aus sogenannten „Consumer Clinics“.

Um maximale Effizienz bei der Entwicklung der ergonomischen Elemente zu gewährleisten und schnelle Entscheidungen in Abstimmung mit dem Kunden zu erleichtern, müssen der digitale und der physische Validierungsprozess parallel durchgeführt werden. Für die Ergonomie-Simulationen im Rahmen der virtuellen Validierung wird ein Software-Tool eingesetzt (wie z. B. Ramsis) und bei der parallel verlaufenden physischen Verifizierung findet ein „ergonomisches Modell“ Anwendung. Am Ende dieses Validierungsprozesses, der mit einer groben Evaluierung der grundlegenden Maße des ergonomischen Konzepts beginnt, steht ein kleinteiliges Sitzmodell der Innen- und Außengestaltung, das die Basis für eine vollumfassende Validierung und Genehmigung der ergonomischen Gestaltung bildet.

Neben der Gestaltung eines grundlegenden Ergonomie-Packages für den Fahrer- und Beifahrerraum sind unter anderem die Erreichbarkeit von HMI-Elementen („Human Machine Interface“ bzw. Mensch-Maschine-Schnittstelle) und die Optimierung der Einstiegs-/Ausstiegsmaße Beispiele für Herausforderungen, bei denen eine Balance zwischen dem Styling (Innen- und Außengestaltung) und den ergonomischen Zielen gefunden werden muss.

Als Beispiel soll hier ein Projekt von FEV im Bereich der Gesamtfahrzeugentwicklung herangezogen werden, bei dem das für die Innengestaltung gewählte Motiv ein direkt in der Mitte angeordnetes, auf das Kombiinstrument ausgerichtetes Display vorgab. Dadurch ergaben sich aufgrund des relativ großen Abstands zwischen Fahrer und Display allerdings Probleme im Hinblick auf die Erreichbarkeit der Elemente. Die Lösung bestand in der Modifizierung des HMI-Konzepts, die zu einer Aufteilung der Benutzeroberfläche führte. So konnte sowohl den gestalterischen als auch den

ergonomischen Anforderungen Rechnung getragen werden. Konkret wurde zunächst ermittelt, welche Bereiche auf dem Display für die Zielkunden-Perzentile erreichbar waren. Anschließend wurden die HMI-Inhalte entsprechend angepasst. So gelang es FEV letztlich, das gewünschte stilistische Motiv ohne negative Auswirkungen auf den alltäglichen Fahrzeugbetrieb durch den Endnutzer zu wahren.

## Entwicklung der Fahrzeugattribute

Das für die Fahrzeugentwicklung zuständige Team von FEV deckt alle Aspekte ab, die im Bereich der Funktionsentwicklung zu berücksichtigen sind, unter anderem:

- Sicherheit
- Fahrzeugdynamik
- NVH
- Thermomanagement
- Aerodynamik
- Effizienz
- Performance
- Abmessungen, Gewicht und Geometrie
- Wassermanagement, Staub und Korrosion
- Qualität
- Compliance

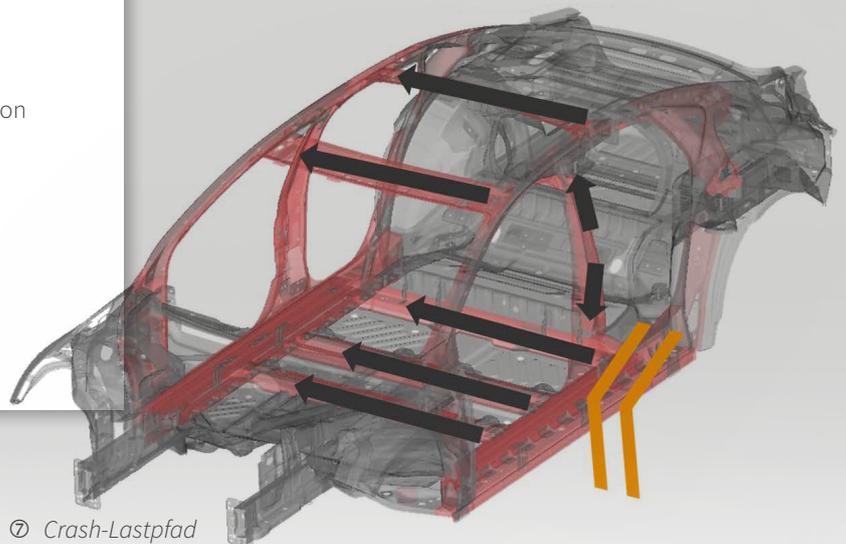
» Im Folgenden soll der Fokus auf sicherheitsbezogene und aerodynamische Eigenschaften gerichtet werden.



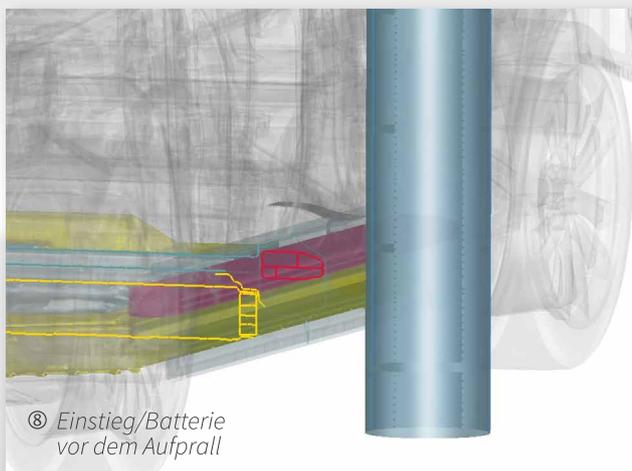
## Seitenfahlaufprall

Um zu prüfen, welchen Schutz ein Fahrzeug während eines Seitenaufpralls bietet, führt das Euro NCAP (European New Car Assessment Programme, Europäisches Neuwagen-Bewertungs-Programm) u.a. den „Seitenpfahltest“ durch. Besonderes Augenmerk wird hier auf die Batteriesicherheit gelegt, da starke Verformungen am Boden und somit potenziell an der Batterie zu einem sogenannten thermischen Durchgehen führen können, sofern keine Gegenmaßnahmen getroffen werden. Bei diesem Test prallt ein Fahrzeug mit 32,2 km/h in einem schrägen Winkel von 75 Grad auf einen fest im Boden verankerten, starren Pfahl – so wird ein Aufprall auf einen Baum oder Pfahl simuliert.

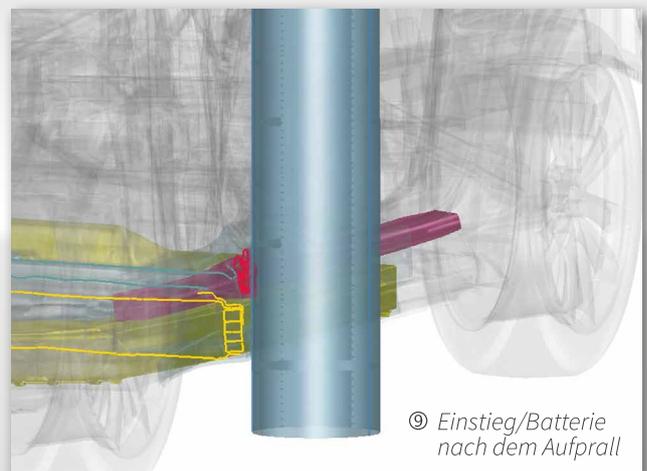
Die Notwendigkeit eines speziellen Lastpfads am Unterboden (eine Konstruktion, die hohe Energiemengen absorbieren kann und einen hohen Intrusionsschutz bietet, um die Aufprallkraft abzufangen) wird in der frühen Designphase identifiziert. Durch eine Optimierung der strukturellen Topologie mithilfe hochmoderner Simulationstools lässt sich eine bestmögliche Balance zwischen Styling, Funktionalität, Performance und Gewicht erzielen. Die Entwicklungsziele leiten sich von den Funktionsanforderungen an die Bodenstruktur, einer minimalen Verformung der Batterie und den an realen Gegebenheiten orientierten Sicherheitsanforderungen ab.



© Crash-Lastpfad



© Einstieg/Batterie vor dem Aufprall



© Einstieg/Batterie nach dem Aufprall

Das Design der Schweller und der Stützstruktur wirkt sich wesentlich auf die Sicherheitsleistung aus. Die Schweller müssen darauf ausgelegt werden, bei einem Aufprall möglichst viel Energie zu absorbieren und diese Aufprallenergie zur größeren Fläche am Einstieg weiterzuleiten. Die Schwellerverstärkung (ein Aluminium-Extrusionsprofil) wird strategisch so positioniert, dass eine maximale Überlappung mit der Stützstruktur am Unterboden gegeben ist. Zwecks Aufprallresistenz und Verstärkung des Fahrgastraums wird die Stützstruktur als extrem starrer, durchgängiger Querträger ausgelegt. Indem für die Schwellerverstärkung Aluminium verwendet wird, kann ein optimales Ergebnis im Hinblick auf ein geringeres Gewicht und eine hohe strukturelle Leistung erzielt werden. Mit einem solchen Designkonzept kann zudem ein vernünftiges Gleichgewicht zwischen dem Styling (Minimierung der Knautschzone) und den strukturellen Anforderungen erreicht werden.

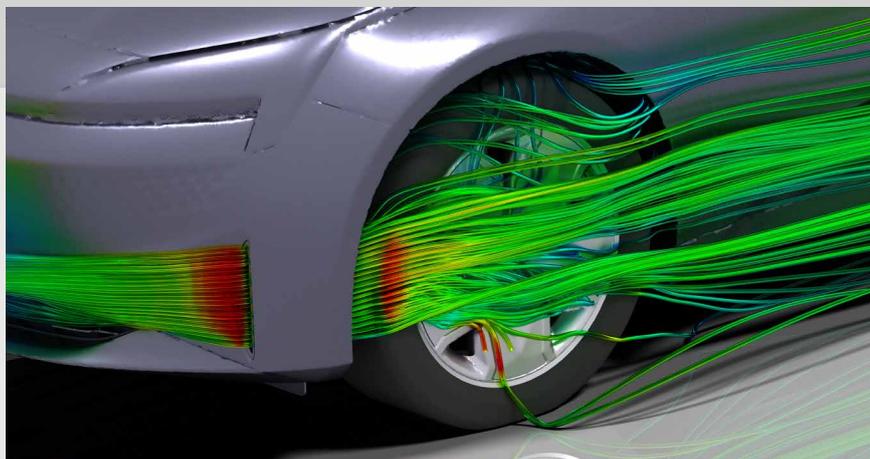
Ein spezieller „Unterboden-Lastpfad“ und eine gut in die Rohkarosserie integrierte Batterie können die Lastübertragung (etwa 45 Prozent der Aufpralllast) an den Lastpfad der oberen Struktur maximieren. So wird die Bildung eines aktiven Lastpfades durch das Batteriegehäuse verzögert und die auf die Batterie wirkende Aufprallkraft (ca. 28 Prozent der Aufpralllast) reduziert. Der Rest der Aufpralllast wird dann auf die starre obere Struktur (B-Säule, Tür, A-Säule) abgeleitet und der Sicherheitskäfig bleibt unversehrt. Das starre Außenprofil des Batteriegehäuses weist in seitlicher Richtung einen relativ hohen Biege widerstand auf, was die Wahrscheinlichkeit einer Intrusion in das Modul reduziert, das Risiko eines Batterieschadens erheblich senkt und die Intaktheit des Modulraums gewährleistet.

10 Durchströmung eines Air Curtains

## Entwicklung der Aerodynamik

Die Optimierung der Aerodynamik spielt in jedem Fahrzeugentwicklungsprozess eine entscheidende Rolle zur Realisierung verschiedener Zielgrößen. Bei konventionell angetriebenen Fahrzeugen wirkt sich ein hoher Luftwiderstand negativ auf den Kraftstoffverbrauch und somit den CO<sub>2</sub>-Ausstoß aus. Bei Elektrofahrzeugen wird die Reichweite, die für den Kunden ein Schlüsselmerkmal darstellt, in hohem Maß beeinflusst. FEV bietet daher einen vielseitigen und flexiblen Optimierungsprozess an, der jeden Schritt von der ersten Designskizze bis zum Serienanlauf abdeckt.

Eine zentrale Herausforderung zum Erreichen eines niedrigen cw-Wertes besteht darin, sämtliche Maßnahmen in Einklang mit anderen Gesamtfahrzeuganforderungen zu bringen. Dazu zählen Styling, Package, Ergonomie, Thermalanforderungen und viele weitere. Insbesondere die Styling-Vorgaben können dabei häufig mit denen der Aerodynamik in Konflikt stehen. Im Rahmen eines FEV Fahrzeugprojekts war beispielsweise die Realisierung eines ambitionierten cw-Wertes erforderlich, um die geforderte Reichweite umzusetzen. Gleichzeitig war eine Abweichung vom initialen Styling-Konzept nicht gewünscht. Neben diverser Detailoptimierungen bestand eine der von FEV umgesetzten Lösungen in der Integration eines Air Curtains in die Frontstoßstange (siehe Abbildung 10). Dadurch konnte die lokale Strömungsablösung an der Vorderseite, die durch die vorgegebene Kombination eines kurzen Überhangs mit einem steilen Pfeilungswinkel entstand, signifikant minimiert werden.



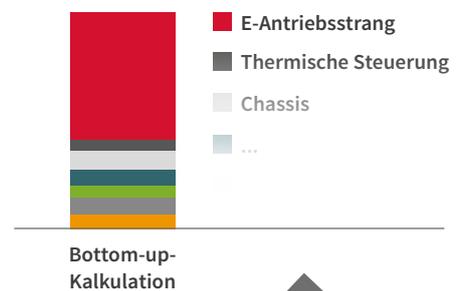
In der Aerodynamikentwicklung werden sowohl CFD-Simulationen (Computational Fluid Dynamics) als auch Windkanaluntersuchungen eingesetzt. Insbesondere in der frühen Entwicklungsphase setzt FEV bei der Optimierung intensiv auf den Einsatz von CFD. So lassen sich bereits ohne Prototyp frühzeitig Maßnahmen identifizieren und dabei das gesamte Strömungsfeld visualisieren. Aufgrund der Quereinflüsse der numerischen Modellierung werden noch vor dem Styling Freeze Windkanalversuche hinzugezogen. Zu diesem Zweck wurde in einem FEV-Fahrzeugprojekt ein 1:1 Clay-Modell erstellt. Dies ermöglichte eine Validierung der Simulationsmodelle sowie die weitere Ausarbeitung von Optimierungsmaßnahmen im Windkanal. Im Rahmen dieses Vorgehens konnten eine präzise Vorhersage der FEV Simulationsmethoden nachgewiesen sowie die vom Kunden definierten Zielwerte für Luftwiderstand und Auftrieb erreicht werden.

## ERSTE (GENERISCHE) STÜCKLISTE

PDM	Module	Group	System / Module / Part Name
1000	E-Powertrain	30	HV Battery
1000	E-Powertrain	30	PowerBatteryDevice
1000	E-Powertrain	35	Electric Drive Unit
1000	E-Powertrain	35	EDU Front (ElectricalDriveUnit) 115kW
1000	E-Powertrain	35	EDU Rear (ElectricalDriveUnit) 185kW
1000	E-Powertrain	35	VCU (VehicleControlUnit)
1000	E-Powertrain	35	ElectronicGearShiftSwitch
1000	E-Powertrain	35	PowertrainMount
1000	E-Powertrain	35	DriveShaftsFront
1000	E-Powertrain	35	DriveShaftsRear
1000	E-Powertrain	37	DC/DC-Converter
1000	E-Powertrain	37	DC/DC-Converter
1000	E-Powertrain	39	On Board Charger (Integrated = CDU)

- Wesentliche Fahrzeugsysteme
- Haupt-/Unterbaugruppen
- Erste (grobe) Spezifikationen

## ERSTE KOSTENPROGNOSE



## GROBE FAHRZEUG- UND SYSTEMSPEZIFIKATIONEN



- 4-türiger SUV (Premium-Segment)
- Grobes Fahrzeug-Kostenziel
- Level 3 des autonomen Fahrens
- 100-kWh-Batterie
- E-Motor mit einer Systemleistung von 300 kW

⑩ Kostenprognose mit der Erstellung einer generischen Stückliste

## Stücklistenbasierte Kostenkalkulation

Im Bereich der Produktkalkulation bietet FEV ein erstklassiges Dienstleistungsportfolio, das den gesamten Produktentwicklungsprozess von der Vorkonzeptphase bis zum Fertigungsbeginn umfasst. Erfolgreiche Lieferantenverhandlungen setzen ein tiefes Verständnis der Produktkosten und der technischen Merkmale der Komponenten voraus. Diese Einzelheiten liegen zu Beginn eines Fahrzeugentwicklungsprojekts in den meisten Fällen jedoch nicht vor.

Der bewährte Kostenbenchmark-Ansatz von FEV, der eine ausführliche Analyse aller Fahrzeugkomponenten einschließt, ermöglicht bereits in einer frühen Phase der Fahrzeugentwicklung realistische Einschätzungen im Hinblick auf die Spezifikationen von Komponenten, das Design und mögliche Fertigungstechnologien. Auf dieser Basis kann FEV Komponentenkosten kalkulieren, auch wenn noch keine vollständigen technischen Einzelheiten vorliegen.

Die Kostenprognose beginnt bereits frühzeitig mit der Erstellung einer generischen Stückliste (Bill Of Materials, BOM) für das Gesamtfahrzeug. Dazu zählt auch die Evaluierung der wichtigsten System und Komponenten (Rohkarosserie, Sitze, Infotainment, HV-Batterie, u.a.). Unter Einsatz der Kostenanalyse-Datenbanken, parametrischer Kostenmodelle und Bottom-up-Kostenkalkula-

tionen kann FEV die anfänglichen Designkosten in sehr kurzer Zeit mit relativ hoher Genauigkeit prognostiziert werden. Diese anfängliche Kostenprognose fließt dann mit dem Ziel in die Entscheidungen des Entwicklungsteams ein, alle technischen Programmanforderungen zum niedrigsten Preis zu erfüllen. Auf Grundlage der technischen Daten, die im Projektverlauf verfügbar werden, kann die Kostenanalyse kontinuierlich angepasst werden. Dies stellt eine hohe Transparenz und Genauigkeit sicher und ermöglicht frühzeitig fundierte Entscheidungen.

Von

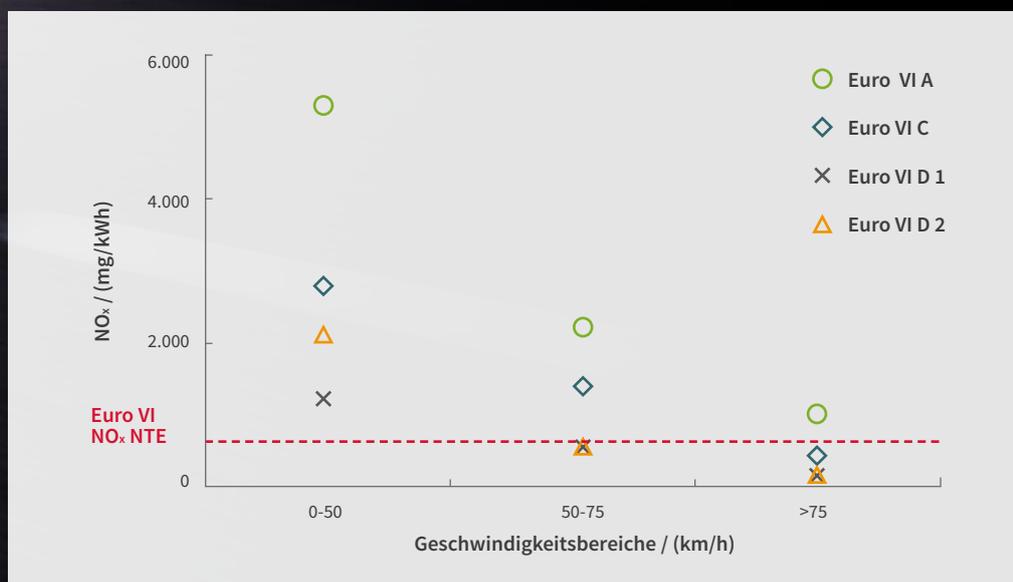
Dr. Christian Sahr · sahr@fev.com  
 Lim Huat Heng · lim.huat-heng@fev.com  
 Jan Pischinger · pischinger\_ja@fev.com

## TRUCK EATS

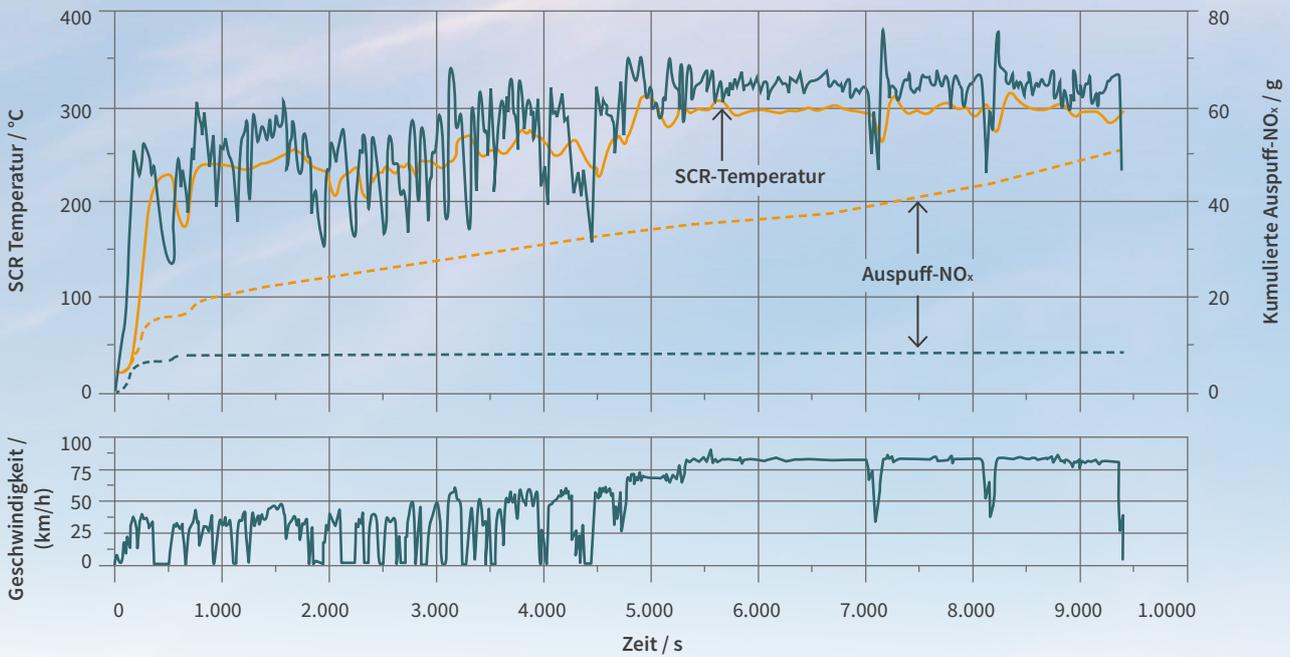
EIN NEUARTIGES ABGASNACHBEHANDLUNGSSYSTEM  
FÜR SCHWERE NUTZFAHRZEUGE MIT GERINGSTEN  
NO<sub>x</sub>-EMISSIONEN



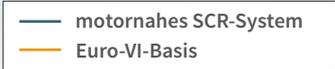
Dieser Artikel befasst sich mit der Konstruktion und Integration eines neuartigen Abgasnachbehandlungssystems (Exhaust Aftertreatment System, EATS). Mit dessen Beschreibung wird gezeigt, wie durch den Einsatz aktueller Technologien künftige gesetzliche Emissionsanforderungen an Schwerlast-Lkw-Anwendungen erfüllt werden können. Hauptgrund für die Untersuchung eines Schwerlast-Demonstrationsfahrzeugs ist, dass in der künftigen Emissionsgesetzgebung aller Wahrscheinlichkeit nach sämtliche Fahrscenarien berücksichtigt werden und die Nachbearbeitung von Emissionsdaten, die derzeit zur Standardisierung von Datenauswertungsmethoden in der EU eingesetzt wird, voraussichtlich entfällt. Aktuelle Untersuchungen zeigen, dass viele Fahrzeuge ohne diese Nachbearbeitungsmethoden höhere  $\text{NO}_x$ -Emissionen aufweisen. Dies gilt besonders unter Kaltstart- und städtischen Fahrbedingungen. Untersuchungen an Beispielfahrzeugen (siehe Abbildung 1) legen nahe, dass die Emissionen von Fahrzeugen, die den verschiedenen Euro-VI-Abgasnormen entsprechen, sowohl unter städtischen als auch unter ländlichen Fahrbedingungen die derzeitigen  $\text{NO}_x$ -Grenzwerte überschreiten; einige der älteren Euro-VI-Modelle weisen auch im Autobahnmodus hohe  $\text{NO}_x$ -Emissionen auf.



①  $\text{NO}_x$ -Emissionen-Leistungsverhalten von schweren Euro-VI-Nutzfahrzeugen



© SCR-Temperatur und NO<sub>x</sub>-Emissionen des motornahen SCR im Vergleich zum Basis-SCR gemäß Euro VI auf einer simulierten ISC-Fahrt



Diese Ergebnisse zeigen, wie wichtig es ist, die NO<sub>x</sub>-Emissionen unter Kaltstart- und städtischen Fahrbedingungen noch weiter zu senken, damit die Grenzwerte künftiger Abgasnormen eingehalten werden können. Hinzu kommt, dass alle neu entwickelten Systeme die Anforderungen auch unter Bedingungen erfüllen müssen, die zuvor als irrelevant erachtet wurden, z. B. Stop-and-Go-Verkehr. Ein ebenfalls zu berücksichtigender Aspekt ist die künftige Begrenzung weiterer Emissionen wie der Partikelanzahl (PN<sub>10</sub>), der Ammoniak-Emissionen (NH<sub>3</sub>) sowie der Distickstoffmonoxid-Emissionen (N<sub>2</sub>O). Um diese Schadstoffe vollständig zu kontrollieren, bedarf es einer optimalen Konstruktion und eines optimalen Aufbaus, damit unter allen Betriebsbedingungen eine größtmögliche Einheitlichkeit von Temperatur und Gasstrom erzielt wird.

Vor diesem Hintergrund wurde ein Abgasnachbehandlungssystem für Demonstrationszwecke entwickelt, das die NO<sub>x</sub>-Emissionen in einem breiten Betriebsbereich auf extrem niedrige

Pegel begrenzen soll. Mithilfe von zwei Systemen für die selektive katalytische Reduktion (Selective Catalytic Reduction, SCR) wird eine deutlich bessere Umsetzung erzielt. Das erste SCR-System am Einlass der EATS-Box sorgt für eine schnelle Erwärmung bei geringen Geschwindigkeiten und Lasten und damit für ein frühes Einsetzen der NO<sub>x</sub>-Umsetzung. Die Integration zweier voll funktionsfähiger Systeme in den derzeit vorhandenen Einbauraum bringt jedoch große Herausforderungen für die Konstruktion mit sich. Um den Aufbau des EATS so zu optimieren, dass die Emissionssollwerte erreicht werden, wurde eine Reihe von Simulationen mit der Software xMOD von FEV durchgeführt. Dabei untersuchte man die Auswirkungen verschiedener Aufbaukombinationen, Katalysatorvolumen und Werkstoffe auf die Emissionswerte.

Die Simulationsstudie wurde mit 50-prozentiger und 100-prozentiger Nutzlast im weltweit einheitlichen Fahrzeug-Emissionszyklus (World Harmonized Vehicle Cycle, WHVC) durchgeführt, und zwar

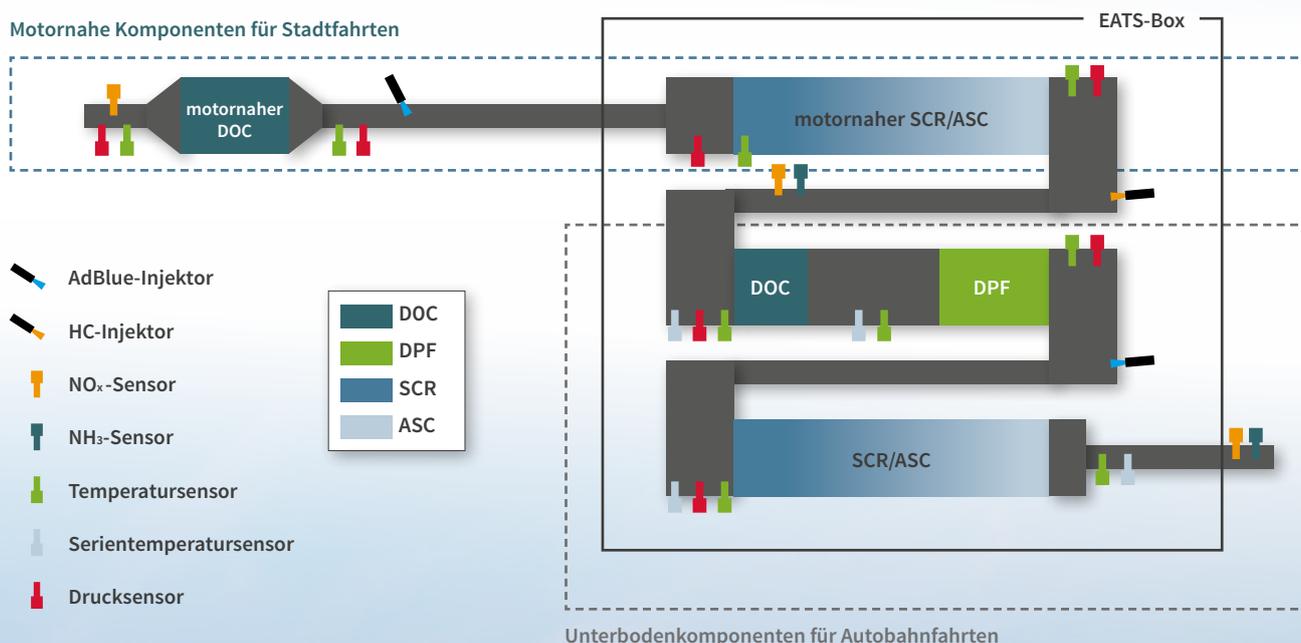


auf einer Euro-VI-Strecke für die Übereinstimmung in Betrieb befindlicher Fahrzeuge (In-Service Conformity, ISC) sowie auf weiteren Strecken (für Lieferfahrten in der Stadt und auf dem Land), wobei die ungünstigsten Kaltstart-Fahrszenarien betrachtet wurden. Der neue Systemaufbau wurde per Simulation mit herkömmlichen Euro-VI-EATS-Systemen verglichen (DOC, DPF, SCR, ASC), um das Potenzial für eine bessere NO<sub>x</sub>-Umsetzung und ein besseres Thermomanagement, insbesondere nach einem Kaltstart, zu ermitteln. Durch die Integration dieser motornahen Komponenten wird ein deutlich besserer Wirkungsgrad der NO<sub>x</sub>-Reduktion in bzw. auf allen untersuchten Zyklen und Strecken erzielt, insbesondere in Kaltstart- und langen Leerlaufphasen. In Abbildung 2 sind die Simulationsergebnisse mit der besseren Erwärmungstemperatur des motornahen SCR im Verhältnis zum Unterboden-SCR des Basissystems für einen ISC-Zyklus dargestellt.

Aus den Simulationsergebnissen wurde der finale Aufbau abgeleitet, nämlich ein EATS mit zwei getrennten SCR-Systemen: einem motornahen und einem mit der üblichen Unterbodenanordnung (Abbildung 3). Aus der Simulation ergaben sich die folgenden Volumina für die Systemkomponenten: ein motornaher

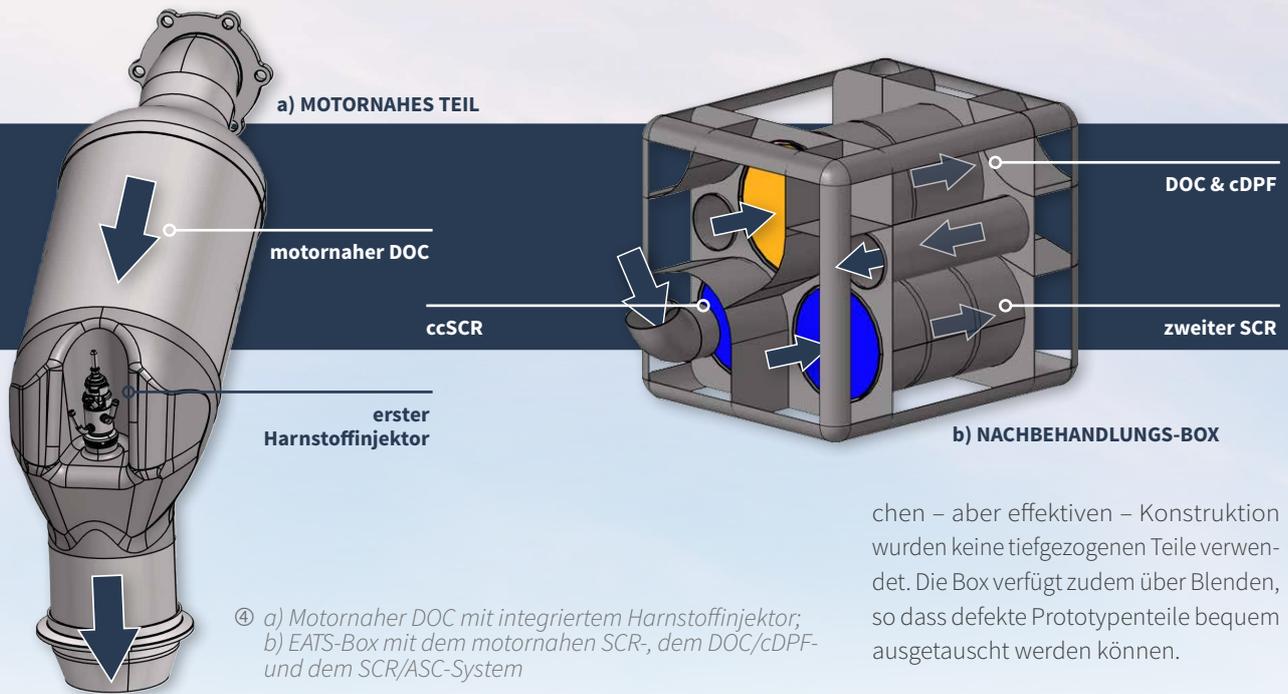
7-l-DOC, gefolgt von einem 25-l-SCR, einem zweiten 7,5-l-DOC, einem 18-l-DPF und einem 25-l-Unterboden-SCR/ASC. Die beiden SCR-Katalysatoren wurden so groß bemessen, dass beide SCR-Systeme unabhängig voneinander arbeiten können, um eine größtmögliche Flexibilität während der Potenzialstudie des Systems zu gewährleisten.

Anhand der anfänglichen Volumenbestimmung wurde unter Berücksichtigung der räumlichen Beschränkungen des aktuellen EATS-Gehäuses der Aufbau des gesamten Abgassystems definiert, einschließlich des Aufbaus und der Anordnung der daran angeschlossenen Leitungen, Mischer und Sensoren, um das größte Potenzial bei minimalen Änderungen des Fahrzeugaufbaus zu schaffen. Der neue motornaher DOC wurde direkt hinter dem Turbolader angeordnet, um eine schnelle CO-/HC-Reduktion und eine optimale Wärmeübertragung in das EATS zu ermöglichen. In den Auslasskonus des DOC wurde ein Harnstoffinjektor eingebaut (Abbildung 4, links), um das Abgasrohr und den Kompensator für ein optimales Vermischen des eingespritzten Harnstoffs nutzen zu können, bevor dieser in den motornahen SCR eintritt, welcher direkt am Einlass der Abgasreinigungs-Box angeordnet ist.



③ Schematischer Aufbau des EATS einschließlich Anordnung der Sensoren

» **UM DIE GRENZWERTE KÜNFTIGER ABGASNORMEN EINHALTEN ZU KÖNNEN, MÜSSEN DIE NO<sub>x</sub>-EMISSIONEN UNTER KALTSTART- UND STÄDTISCHEN FAHRBEDINGUNGEN NOCH WEITER GESENKT WERDEN**



Der motornaher SCR enthält einen zonenbeschichteten Ammoniak-schlupfkatalysator (Ammonia Slip Catalyst, ASC) zur Minimierung der entstehenden Sekundäremissionen. Hinter dem motornahen SCR ähneln die Komponenten einem herkömmlichen Lkw-EATS-Design (siehe Abbildung 4, rechts), mit einem DOC und einem DPF mit integrierter HC-Dosieranlage zur Darstellung einer aktiven DPF-Regeneration. Stromabwärts des DPF befindet sich ein zweiter Harnstoffinjektor mit entsprechender Mischstrecke; anschließend folgt das zweite SCR-System mit integriertem ASC zur Minimierung des Ammoniak-schlupfs. Dieses System soll für geringe  $\text{NO}_x$ -Emissionen unter Autobahnbedingungen sorgen sowie die Möglichkeit der Nutzung der passiven Regeneration aufrechterhalten, um längere Abstände zwischen den Einsätzen der aktiven Regeneration zu erzielen und so gegebenenfalls Kosten und  $\text{CO}_2$ -Emissionen zu senken. Alle Komponenten wurden vor dem Einbau in das EATS hydrothermal gealtert, um realistische Bedingungen entsprechend der Lebensdaueralterung zu schaffen.

Die Abgasrohre wurden dahingehend optimiert, dass Durchströmung, Temperatur und  $\text{NH}_3$ -Verteilung im gesamten System möglichst homogen sind. Die Konstruktion kommt mit einem einfachen Abgasrohr

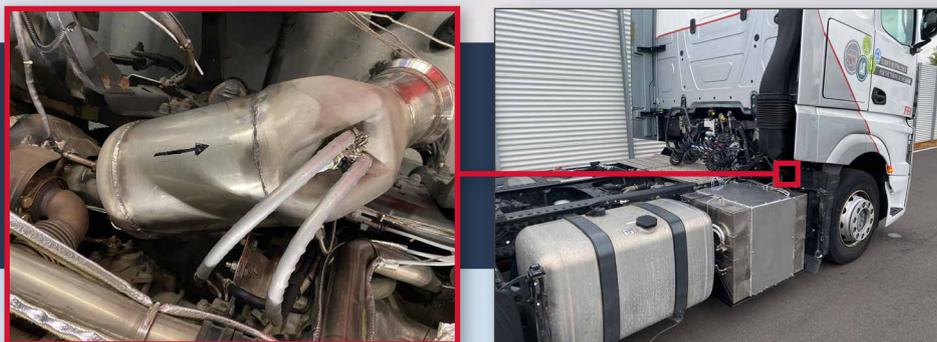
aus, was die Instrumentierung für mobile Emissionsmessungen (Portable Emission Measurement System, PEMS) vereinfacht.

Aufgrund des geringen für motornaher Komponenten zur Verfügung stehenden Einbauraums wurde der erste SCR in die Box aufgenommen, wodurch eine optimale Mischlänge hinter dem DOC im Hinblick auf die bestmögliche  $\text{NO}_x$ -Umsetzung und Kontrolle des Ammoniak-schlupfs sichergestellt wird. Die motornahen Komponenten mussten speziell konstruiert werden, um sie um das Chassis, die Federung und die Räder herum anordnen zu können. Aus ähnlichen Gründen wurde der Injektor in den Auslasskonus des DOC integriert. Die Konstruktion sieht vor, dass die Einspritzung direkt in den von FEV entwickelten Mischer erfolgt, mit dem nachweislich sehr geringe Harnstoffablagerungen erzielt werden. Dadurch sollte zugleich sichergestellt werden, dass sich keine Ablagerungen in dem direkt hinter dem Mischer angeordneten Flexrohr bilden. Die Box wurde so konstruiert, dass das ursprüngliche Packaging beibehalten werden kann. Der gewählte Aufbau bietet jedoch den zusätzlichen Vorteil, dass er die Komplexität der Konstruktion verringert und mehr Standardteile verwendet werden können, wodurch die Gesamtkosten sinken (siehe Abbildung 4, rechts). Im Sinne einer möglichst einfa-

chen – aber effektiven – Konstruktion wurden keine tiefgezogenen Teile verwendet. Die Box verfügt zudem über Blenden, so dass defekte Prototypenteile bequem ausgetauscht werden können.

In den Werkstätten von FEV wurde dann die finale Konstruktion erstellt, wobei sowohl 3D-Druck (für das motornaher DOC-Modul) als auch herkömmliche Blechschneide- und Schweißverfahren zum Einsatz kamen. Schließlich erfolgte die Montage in einem Demonstrationsfahrzeug Daimler Actros 1845 LS 4x2 der Fahrzeugklasse N3 (siehe Abbildung 5) mit einem 12,8-l-Motor mit einem Hochdruck-AGR-System mit Zulassung für Euro VI C. Während der Motor weiterhin mit der ursprünglichen Steuerlogik gesteuert wurde, erfolgte der Betrieb des EATS mittels eines per Rapid Control Prototyping (RCP) entwickelten Steuerungssystems.

Grundlage für die Regelung der aufgerüsteten Abgasnachbehandlung mit zwei SCR ist die neueste Doppeldosierungs-SCR-Software von FEV. Diese arbeitet mit scheibenbasierter Modellierung der Substrattemperatur, reaktionskinetischer Berechnung der Umsetzung sowie einer gekoppelten SCR-Steuerlogik, um die Harnstoff-Dosierungsstrategie für die beiden SCR-Systeme aufeinander abzustimmen, sodass ein möglichst geringer  $\text{NH}_3$ -Schlupf und Harnstoffverbrauch erzielt wird. Nachdem Einbau und Inbetriebnahme des EATS abgeschlossen waren, wurde es auf einen Demonstrationspegel kalibriert, wobei zusätzlich eine Abstimmung zwischen der  $\text{NO}_x$ -Umsetzung und der Bildung von  $\text{N}_2\text{O}$  und  $\text{NH}_3$ -Schlupf



© Das neue EATS im eingebauten Zustand und das Schwerlast-Demonstrationsfahrzeug

erfolgte. Anschließend durchlief der Lkw eine Reihe von Fahrzyklen, in denen das Leistungsverhalten des EATS gemessen wurde. Die Ergebnisse von zwei ISC-Zyklen sind in Abbildung 6 dargestellt. Die bei den Tests erfassten Gesamtumsetzungsraten betragen bei den sensorbasierten Messungen ca. 99,3 Prozent und bei den PEMS-Messungen ca. 99,4 Prozent.

Der entscheidende Vorteil des Systems liegt in der insgesamt besseren Wärmeübertragung vom Motor auf das EATS. Durch die Nähe der EATS-Komponenten erreicht das System die für eine angemessene Harnstoffdosierung erforderliche Temperatur von 200 °C deutlich schneller, als dies bei einer Standardkonfiguration von Emissionstechnologien gemäß Euro VI der Fall ist. Die Aufteilung des SCR in zwei Systeme mit zwei eigenständigen Harnstoff-Dosieranlagen sowie die optimierten Volumina führen außerdem zu extrem niedrigen NO<sub>x</sub>-Emissionen, und zwar auch nach einer kurzen Betriebsphase des Fahrzeugs.

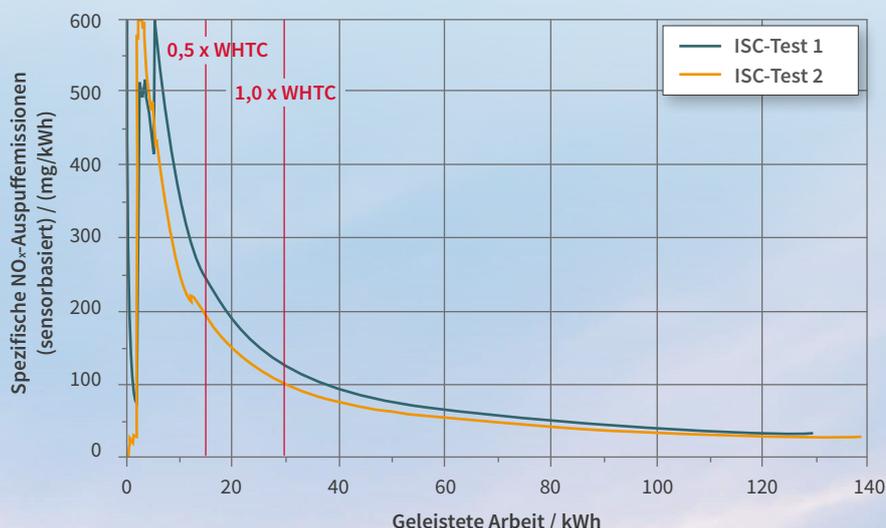
Anhand des Lkw konnte gezeigt werden, dass die NO<sub>x</sub>-Emissionen eines Dieselmotors eines schweren Lkw durch die Kombination aus bestehenden ausgereiften Katalysatortechnologien und einer besseren Motor- und Nachbehandlungssteuerung konstant auf sehr niedrigem Niveau gehalten werden können, und das über einen großen Bereich an Umgebungsbedingungen. Das Design des EATS-Aufbaus beweist zudem, dass diese äußerst

niedrigen NO<sub>x</sub>-Emissionswerte auch mit den Beschränkungen einer typischen Lkw-Anwendung vereinbar sind.

Zu beachten ist allerdings, dass das durchgeführte Programm nicht alle möglichen Kombinationen aus Fahr- und Grenzbedingungen abdeckt, die für eine Serienfertigung erforderlich sind. Erforderlich sind weitere Optimierungsmaßnahmen im Hinblick auf die Dimensionierung anhand gegebener Fahr- und Rahmenaufbauten, das Potenzial der passiven Regeneration, den Druckabfall sowie die Anforderungen einer längeren Lebensdauer.

In einem folgenden SPECTRUM-Artikel werden hierauf aufbauend weitere Fahrzyklusergebnisse besprochen, die u. a. Ergebnisse von PEMS-Messungen mit einem erweiterten PEMS-Analysator-Kit für N<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub> und PN<sub>10</sub> umfassen.

Die Autoren bedanken sich bei den Mitgliedern der AECC, der IPA, bei Corning Inc. sowie bei der Automotive Grade Urea Sector Group des CEFIC für die finanzielle Unterstützung, die Bereitstellung von Katalysator- und Filterteilen sowie für ihre äußerst wertvollen Beiträge zu dieser Untersuchung. Unser Dank geht außerdem an HJS für deren Unterstützung beim Canning des Abgasnachbehandlungssystems.



© Kumulative spezifische NO<sub>x</sub>-Auspuffemissionen einer ISC-Fahrt

#### Von

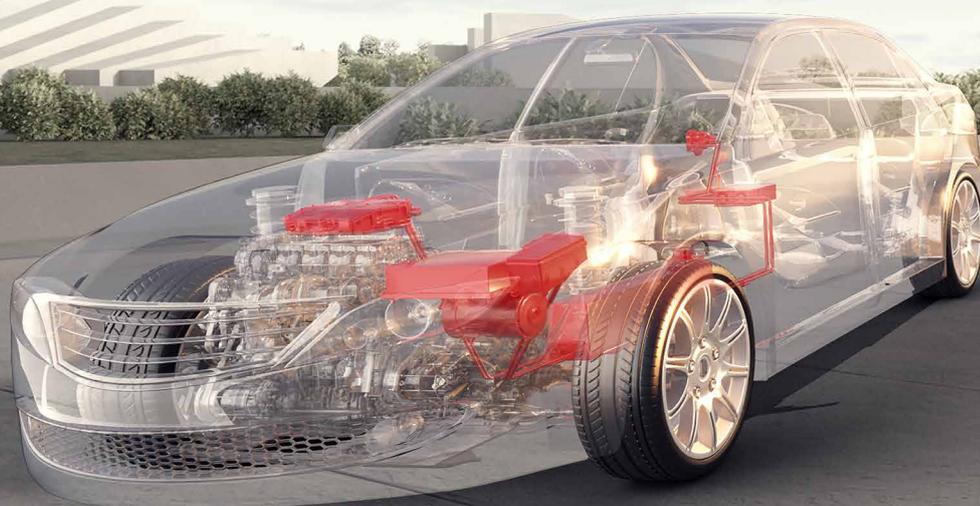
Dr. Lynzi Menne-Robb  
robb@fev.com  
Dr. Markus Schönen  
schoenen@fev.com

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

## HYBRIDANTRIEB

# xHEV-KONZEPT ZUR ERREICHUNG DER CO<sub>2</sub>-ZIELE IM JAHR 2030

*Ökologische Nachhaltigkeit hat einen hohen Stellenwert im öffentlichen Bewusstsein. Die Debatten über den von den CO<sub>2</sub>-Emissionen beeinflussten Klimawandel betreffen alle größeren Industrien und damit auch den Automobil- und Verkehrssektor. Die ambitionierten allgemeinen Ziele der Politik schlagen sich in den CO<sub>2</sub>-Vorschriften für die Fahrzeugflotten der Autohersteller nieder. Die Reduzierung um 37,5 Prozent (-55 Prozent könnten im Rahmen des Green Deals der EU beschlossen werden) für Europa bis 2030 basiert auf 95 gCO<sub>2</sub>/km im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) und berücksichtigt einen Aufschlag für die Übertragung auf das realistischere WLTP-Testverfahren (Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure).*



In einer früheren Studie<sup>(1)</sup> hat FEV gezeigt, dass die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 37,5 Prozent bei einem C-Segment-Fahrzeug, das den EU-Flottendurchschnitt repräsentiert, mithilfe eines optimierten HEV-Antriebsstrangs (in einer Flotte mit 100 Prozent HEV) erreicht werden kann. In der folgenden Studie wird auch das mögliche zukünftige Ziel von -55 Prozent berücksichtigt und in die Antriebsstrang-Technologie-Roadmap für eine repräsentative Flotte aufgenommen. Für diese Flotte im Jahr 2030 werden folgende Antriebsstränge betrachtet:

- 48-V- oder Hochvolt-Vollhybrid-Fahrzeuge (HEV)
- Plug-in-Hybridfahrzeuge (PHEV)
- Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV)

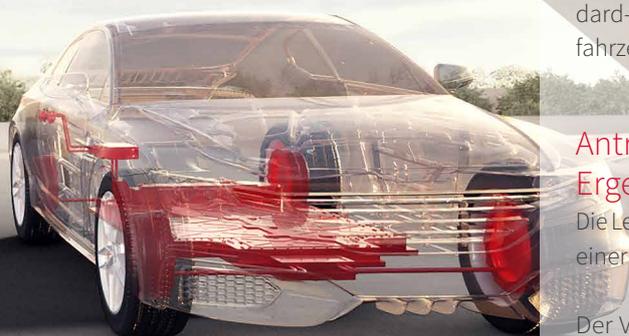
Um den durchschnittlichen Flottenverbrauch eines Standard-OEM im Jahr 2030 zu berechnen, wurden die drei Hauptfahrzeugsegmente A/B, C und D/E untersucht.

### Antriebsstrangarchitektur und CO<sub>2</sub>-Ergebnisse für Fahrzeuge im Jahr 2030

Die Leistungsziele für jedes Segment wurden von den Ergebnissen einer Analyse des Nutzungsverhaltens der Kunden abgeleitet.

Der Verbrennungsmotor (Internal Combustion Engine, ICE) beruht auf der DHE-Familie (Dedicated Hybrid Engine) von FEV. Mit einem kosteneffektiven Technologiepaket kann dieser Motor einen thermischen Bremswirkungsgrad von mehr als 43 Prozent erreichen; sogar noch höhere Werte werden derzeit untersucht. Die ICE-Leistung (sowie die Leistung der E-Maschinen) wird für jedes Antriebsstrangkonzzept individuell angepasst, um die Leistungsziele des jeweiligen Segments zu berücksichtigen. Fahrzeugverbesserungen, die zu einer Reduzierung von Gewicht, Luftwiderstand und Rollwiderstand führen, haben erhebliche Auswirkungen auf die Antriebsstrangarchitektur und die CO<sub>2</sub>-Emissionen. Daher wurde anhand der Ergebnisse aus der früheren Studie<sup>(1)</sup> die Entwicklung von Luft- und Rollwiderstand bis 2030 abgeschätzt.

Luft- und Rollwiderstand variieren von Segment zu Segment. Hierbei wurden u. a. die Konstanzsensibilität berücksichtigt, sodass beispielsweise im A/B-Segment bestimmte Zusatztechnologien nicht eingesetzt werden können.



Die resultierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen im A/B-Segment sind in Abbildung 1 dargestellt. Trotz des niedrigeren Spannungsniveaus von 48 V wirkt sich das Hybridsystem durchaus positiv aus.

Ausgehend von einem bereits hervorragenden Wert des Fahrzeugs von 2020, der mit dem DHE von FEV und einer verbesserten Aerodynamik erzielt wird, ergibt sich durch die Kombination aus Fahrzeugverbesserungen und einer weiteren Anpassung des ICE eine CO<sub>2</sub>-Reduktion von 13 Prozent.

Die Ergebnisse für das C-Segment sind in Abbildung 2 zusammengefasst. Dabei ist zu betonen, dass der Vorteil des leistungsverzweigten Hybrids (teilweise) auf die definierten Randbedingungen zurückzuführen ist.

Wird die Gewichtung auf die Beschleunigung von 0 auf 100 km/h gelegt, dann verschieben sich die Ergebnisse zu den anderen Optionen. In die Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen ausgehend von dem Fahrzeug von 2020 (48-V-P0) hin zu dem Fahrzeug von 2030 mit 400-V-leistungsverzweigten Hybrids fließen die folgenden Faktoren mit ein:

- Fahrzeugverbesserungen (u. a. Aerodynamik, Gewicht, Rollreibung) zu etwa 44 Prozent
- Hybridtopologie einschließlich Getriebe zu etwa 34 Prozent
- ICE-Aufrüstung, Optimierung der Lastpunktverteilung und Downsizing zu etwa 22 Prozent

Die Ergebnisse für die CO<sub>2</sub>-Emissionen im D/E-Segment sind in Abbildung 3 dargestellt. Mit Blick auf die Interpretation der Ergebnisse ist zu erwähnen, dass hier – im Gegensatz zu den anderen Segmenten aus dem Jahr 2020 – aufgrund der aktuellen Verteilung in diesem Segment ein konventioneller Antriebsstrang sowohl mit Benzin- als auch mit Dieselmotor dargestellt wurde.

Bei einer Elektrereichweite von mehr als 80 km im WLTP liegen die CO<sub>2</sub>-Emissionen der seriellen und der seriell/parallelen Hybridarchitektur deutlich unter 20 g CO<sub>2</sub>/km. Aufgrund der Änderung der Berechnungsvorschriften sind die Ergebnisse des NEFZ etwas höher als die des WLTP-Zyklus.

Die Flotten-CO<sub>2</sub>-Emissionen sind wichtiger als die Ergebnisse für die einzelnen Fahrzeuge/Segmente. Daher wird eine repräsentative Flotte anhand der zuvor gezeigten Ergebnisse erstellt. Dabei werden die folgenden Randbedingungen berücksichtigt:

- Die Basislinie wird durch das CO<sub>2</sub>-Emissionsziel von 95 g CO<sub>2</sub>/km für 2021 definiert.
- Diesel- und Benzin-ICE (sowie xHEV und BEV) werden in der Basislinie entsprechend ihrem Marktanteil von 2019 berücksichtigt.
- Um die Komplexität zu reduzieren, wird angenommen, dass sich die Verteilung zwischen den Segmenten von 2019 bis 2030 nicht ändert.

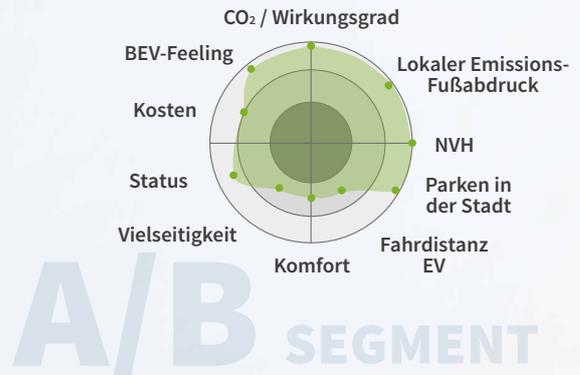
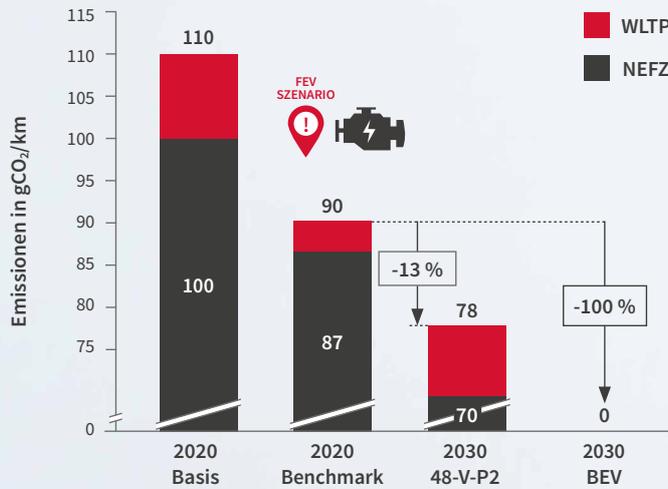
Die Ergebnisse werden unter NEFZ-Randbedingungen dargestellt und es wird ein Aufschlag für den WLTP-Zyklus hinzugefügt (auf Basis der oben beschriebenen Ergebnisse für die Segmente).

In diesem Fall liegen die Verbesserungen von den Zielen 2021 bis 2030 bei 40 Prozent für ausschließlich (P)HEV und bei 55 Prozent für einen BEV-Anteil von 27 Prozent. Damit wird das vorgesehene Ziel der Europäischen Kommission (55 Prozent) erreicht, erfordert aber bereits einen erheblichen Beitrag des Fahrzeugs, einen signifikanten BEV-Anteil sowie eine Optimierung des ICE und des Hybridsystems selbst.

Natürlich sind die CO<sub>2</sub>-Verbesserungen der Flotten im Jahr 2030 teilweise durch die Gesetzgebung für PHEV begründet, die häufig kritisiert wird, weil der Kraftstoffverbrauch unter realen Fahrbedingungen (und damit die CO<sub>2</sub>-Emissionen) des PHEV wesentlich höher ist als die Ergebnisse der Homologation. Der Hauptnachteil ist, dass der Kunde/Fahrer die Plug-in-Funktion nicht häufig genug nutzt, was nachfolgend behandelt wird.

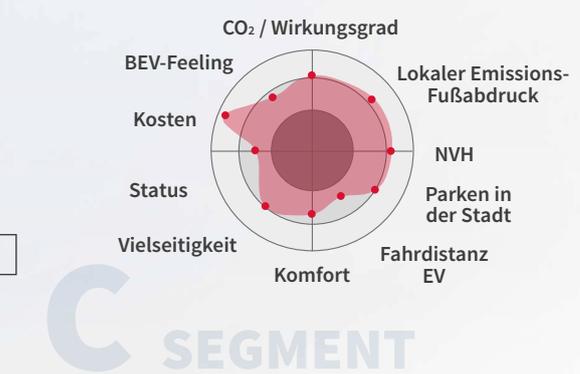
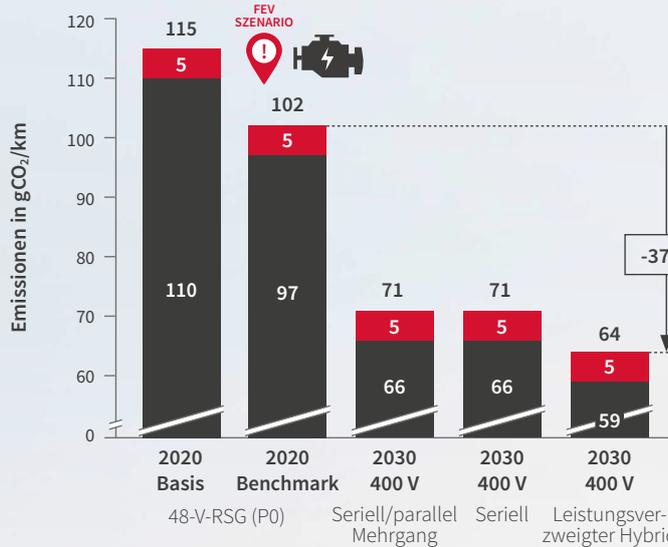


AUSWERTUNG – ZWEITWAGEN, KURZSTRECKENFAHRER, KOSTENSENSITIVER TÄGLICHER PENDLER



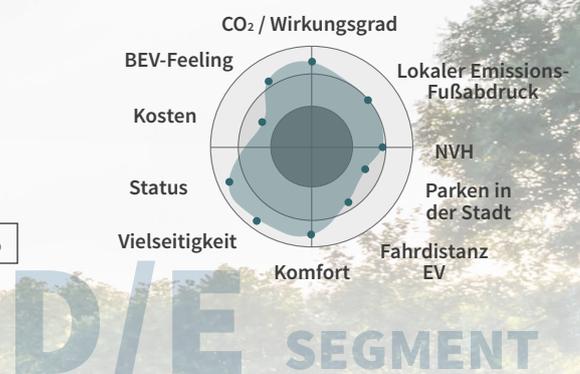
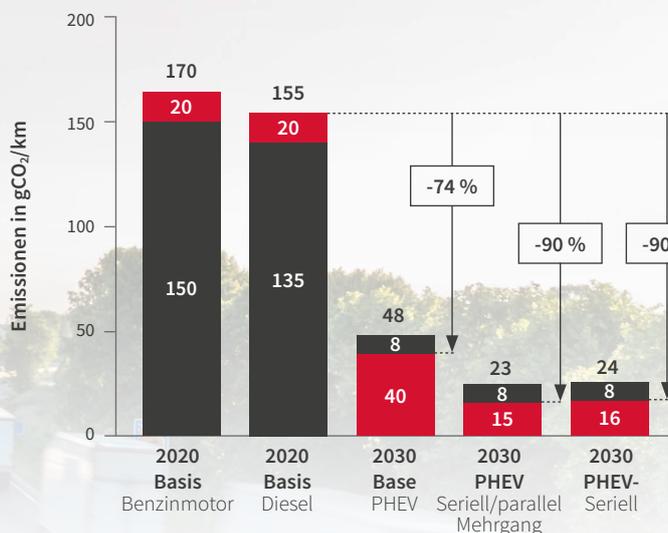
① CO<sub>2</sub>-Emissionen konventioneller Basis- und Benchmark-Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor von 2020 im Vergleich zu einem 48-V-P2-HEV und einem BEV von 2030 aus dem A/B-Segment

AUSWERTUNG – TÄGLICHER PENDLER



② CO<sub>2</sub>-Emissionen von 48-V-MHEV-Basis- und Benchmark-Fahrzeugen von 2020 im Vergleich zu verschiedenen Hochvolt-HEV von 2030 aus dem C-Segment

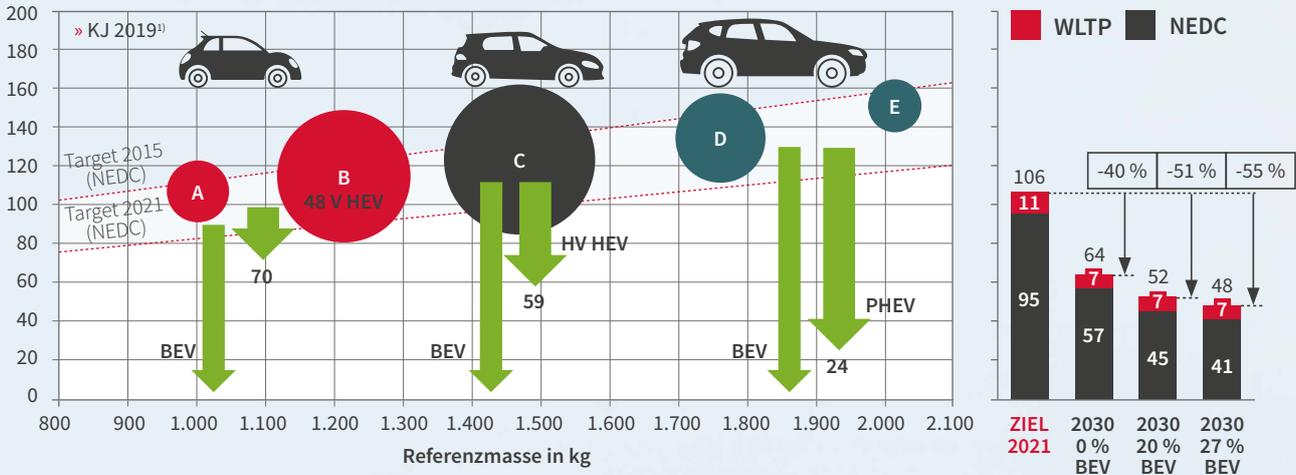
FAHRZEUGAUSWERTUNG – DIENSTWAGEN / FAMILIEN-FAHRZEUG



③ CO<sub>2</sub>-Emissionen von Benzin- und Diesel-Basisfahrzeugen (ohne Hybridisierung) von 2020 im Vergleich zu einem Basis-PHEV von 2020 und Hochvolt-PHEVs von 2030 aus dem D/E-Segment

CO<sub>2</sub>-EMISSIONEN IM NEFZ FÜR BENZIN UND DIESEL NACH FAHRZEUGSEGMENTEN IN EUROPA IM JAHR 2019

CO<sub>2</sub>-Emissionen in g/km



④ Segmentspezifische und über die Flotte gemittelte EU-CO<sub>2</sub>-Emissionsziele für Pkw im NEFZ (WLTP mittels Aufschlag berücksichtigt) für 2021 und Ausblick auf 2030 mit ausschließlich Benzin-(P)HEV und mit bis zu 27 Prozent BEV

Kraftstoffverbrauch unter realen Fahrbedingungen unter Berücksichtigung des Batterieladeverhaltens

Die Unterschiede zwischen den homologierten CO<sub>2</sub>-Emissionen und dem Kraftstoffverbrauch von PHEV unter realen Fahrbedingungen sind bereits in zahlreichen Artikeln in einer hitzigen Debatte erörtert worden. PHEV haben jedoch ein erhebliches Potenzial, wenn es darum geht, das Beste aus beiden Welten zu vereinen, und können sehr niedrige Schadstoffemissionen erzielen.

Eine Nichtnutzung der Plug-in-Funktion (ladungserhaltender Modus (Charge Sustaining-Modus, CS) hat entsprechende Auswirkungen in verschiedenen Zyklen. In den NEFZ/WLTP-Zyklen sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen deutlich höher als der Zertifizierungswert. Dies gilt fast ungeachtet der gewählten Hybridtopologie. Fahrzyklussimulationen zeigen, dass im CS-Modus Ergebnisse für das Jahr 2030 im Vergleich zu den aktuellen Fahrzeugen um 24 bis 28 Prozent niedriger ausfallen werden, wobei die seriell/parallelen PHEV einen CO<sub>2</sub>-Vorteil von 6 Prozent gegenüber den seriellen PHEV im CS-WLTP bieten.

Insbesondere der geringe Vorteil des seriell/parallelen Hybridmodells erscheint überraschend, da die Verluste im elektrischen Pfad eines seriellen Hybridfahrzeugs (diese entstehen u. a. bei der Umwandlung der Energie des ICE in elektrische Leistung durch den Generator) normalerweise immer höher waren als

die Verluste im Getriebe von seriell/parallelen Hybridtopologien. Dies wird jedoch durch die folgenden Faktoren teilweise wieder ausgeglichen:

- Höherer maximaler Wirkungsgrad des ICE bei den stärker phlegmatisierten ICE eines seriellen Hybrids
- Betrieb des ICE an einem etwas günstigeren Lastpunkt bei Langstreckengeschwindigkeit, was sich aus der gewählten Randbedingung ergab
- Erhöhung des Wirkungsgrads im elektrischen Pfad (Umrichter/E-Maschine), die höher ausfällt als die Wirkungsgradsteigerung des Getriebes bis 2030
- Umgehung der Batterie bei Langstreckenfahrten, da die Energie direkt vom Generator auf den E-Antrieb übertragen wird

Ein wichtiger zu erörternder Punkt bei der Beurteilung von PHEV betrifft die Dimensionierung der Batterie und deren Einfluss auf das Fahrverhalten. Die entsprechende Auswertung unter Berücksichtigung des Ladeverhaltens basiert auf einem „Geschäftsfahrerzyklus“ von FEV unter Annahme einer 23 km langen Fahrt zur Arbeit, einer Geschäftsreise von 300 km pro Woche sowie eines Familienausflugs von 200 km pro Monat (jeweils einfache Strecke). Die Fahrgeschwindigkeit bei der Langstreckenfahrt wird mit 130 km/h angenommen. Die Batteriegröße ist so gewählt, dass 80 km elektrische Reichweite im WLTP als Basiswert erreicht werden, und wird dann erhöht um 50 und um 100 Prozent. Hauptsächlich aufgrund der Langstreckenfahrt

ohne Ladevorgang (CS-Modus) steigen die CO<sub>2</sub>-Emissionen auf 137 g CO<sub>2</sub>/km. Bemerkenswert ist der CO<sub>2</sub>-Anstieg um 4 Prozent bei einer Verdopplung der Batteriegröße.

Hauptsächlich wegen des höheren Fahrzeuggewichts, welches durch einen höheren Batteriewirkungsgrad nicht ausgeglichen werden kann (weil die C-Raten bereits auf niedrigem Niveau sind), sinken die CO<sub>2</sub>-Emissionen auf 57 (39 bzw. 35) g CO<sub>2</sub>/km bei Batterien mit 18 (27 bzw. 35) kWh, wenn die Batterie immer (d. h. vor jedem Fahrtantritt) geladen wird. Wird die Batterie nur einmal (zweimal bzw. dreimal) pro Woche geladen, führt dies bereits zu CO<sub>2</sub>-Emissionen von 121 (103 bzw. 84) g CO<sub>2</sub>/km (jeweils auf Basis der 27-kWh-Batterie). Daraus kann das Fazit gezogen werden, dass bei einem typischen Geschäftswagenfahrer eine Batterie mit 27 kWh einen sehr vorteilhaften Kompromiss mit niedrigen CO<sub>2</sub>-Emissionen unabhängig vom Plug-in-Verhalten bietet. Am bemerkenswertesten ist, dass die Entscheidung über die Hybridtopologie (fast) unabhängig von den CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Zertifizierung und unter realen Fahrbedingungen getroffen werden kann und stattdessen rein auf die Kundenstrategie und die Produktions-/Entwicklungskosten gestützt werden kann. Natürlich wird bei dieser Analyse der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der Batterieherstellung vernachlässigt, der mit zunehmender Batteriegröße steigt, wobei der Trend in Richtung einer CO<sub>2</sub>-neutralen Produktion geht.

## Zusammenfassung und Fazit

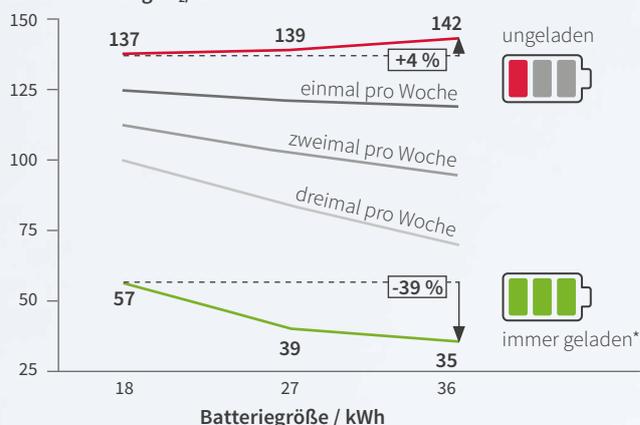
Um die EU-Gesetzgebung bezüglich der CO<sub>2</sub>-Emissionen für 2030 einzuhalten und Strafzahlungen zu vermeiden, sind die Autohersteller gezwungen, die CO<sub>2</sub>-Emissionen ihrer Flotten für neu zugelassene Pkw um 37,5 Prozent zu senken. Es sind sogar noch höhere Zielwerte für die Emissionsreduzierung bis -55 Prozent und mehr im Gespräch.

In dieser Studie wurde eine „repräsentative Fahrzeugflotte“ eines Standard-OEM erstellt, wobei die heutige Segmentverteilung in der EU für drei verschiedene Segmente zugrunde gelegt und verschiedene Fahrprofile berücksichtigt wurden. Es wurde gezeigt, dass mit einer Strategie mit ausschließlich (P)HEV eine Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 40 Prozent gegenüber den Flottenzielen für 2021 erreicht werden kann. Dabei wurden die folgenden Annahmen für die drei Segmente zugrunde gelegt:

- A/B-Segment: kostengünstiges 48-Volt-P2-HEV, das 70 (78) g CO<sub>2</sub>/km im NEFZ (WLTP) erreicht
- C-Segment: Hochvolt-HEV mit Leistungsaufteilung, das 59 (64) g CO<sub>2</sub>/km im NEFZ (WLTP) erreicht
- D/E-Segment: Hochvolt-PHEV, das ~16 (24) g CO<sub>2</sub>/km im NEFZ (WLTP) erreicht

## GESCHÄFTSFAHRER/FAMILIE

### Emissionen in gCO<sub>2</sub>/km\*\*



\* Jede Fahrt wird mit vollständig geladener Batterie angetreten  
 \*\* Serieller Hybrid

⑤ Auswirkung der Batteriegröße und des Batterieladeverhaltens auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen bzw. den Kraftstoffverbrauch unter realen Fahrbedingungen

In Kombination mit einem BEV-Anteil von 27 Prozent (FEV-Szenario für 2030) können Flotten-CO<sub>2</sub>-Emissionen von 41 (48) g CO<sub>2</sub>/km im NEFZ (WLTP) erreicht werden.

Es konnte außerdem gezeigt werden, dass ein PHEV mit einem DHE von FEV (thermischer Bremswirkungsgrad von über 43 Prozent) einen CO<sub>2</sub>-Emissionsvorteil von 24 bis 35 Prozent gegenüber den heutigen herkömmlichen Diesel-/Benzinvarianten erzielt, auch wenn das Batterieladegerät nie angeschlossen wird. In einem Zyklus mit realen Fahrbedingungen mit einem Geschäftswagen ist eine Batterie mit 27 kWh (120 km WLTP-Reichweite im reinen Elektromodus) ein guter Kompromiss, der zu einer signifikanten Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen führt, wenn das Fahrzeug nur ein- oder zweimal pro Woche aufgeladen wird.

## Von

Dr. Tolga Uhlmann · uhlmann@fev.com

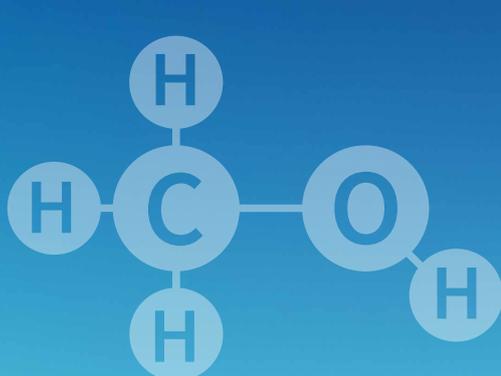
Dr. Dominik Lückmann · lueckmann@fev.com

## Quelle:

(1) Uhlmann, T. et al. High efficient gasoline HEV meeting 2030 CO<sub>2</sub> targets – The road towards 59 g/km fleet CO<sub>2</sub> – The road towards 59 g/km fleet CO<sub>2</sub>, 29. Aachen Colloquium Sustainable Mobility 2020

## E-Fuels

# GRÜNES METHANOL – EIN CO<sub>2</sub>-NEUTRALER KRAFTSTOFF ZUR ERREICHUNG HÖCHSTER WIRKUNGSGRAD E BEI NIEDRIGSTEN SCHADSTOFFEMISSIONEN



*Die Dekarbonisierung der Luft- und Schifffahrt sowie des Langstreckentransports stellt eine große Herausforderung dar. In diesem Zusammenhang ist die Anwendung synthetischer Kraftstoffe eine zeitnah realisierbare Alternative für diese Sektoren und ihre spezifischen Anforderungen. Ausgehend von erneuerbarer elektrischer Energie ist Methanol der einfachste flüssige synthetische und einer der vielversprechendsten alternativen Kraftstoffe – insbesondere für die Schifffahrt.*

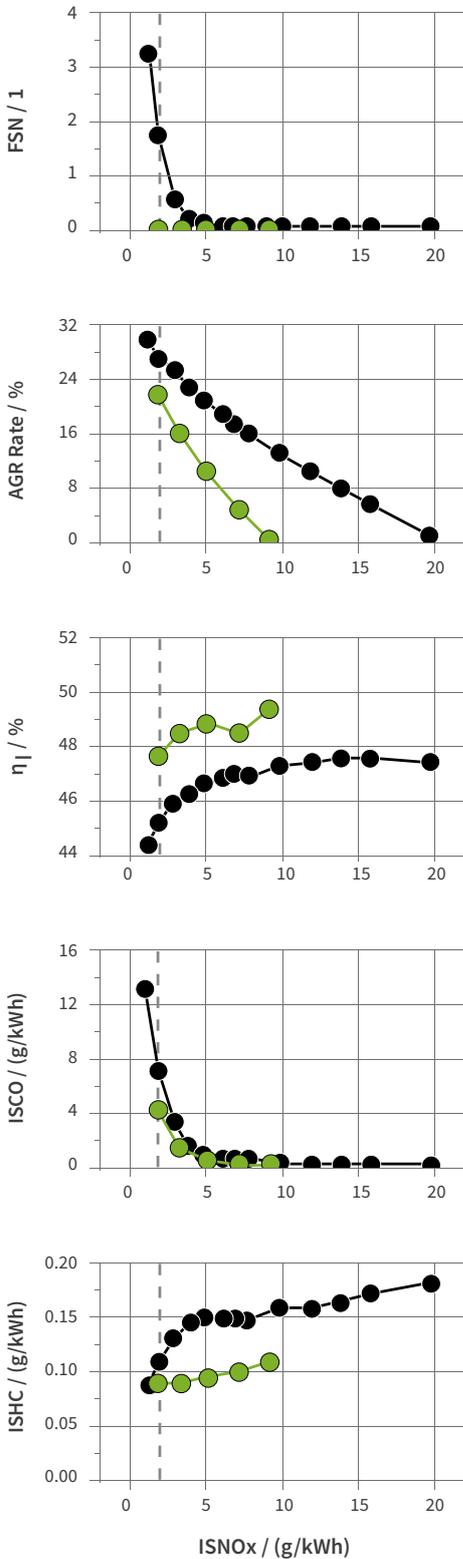
**M**ethanol eignet sich sowohl für die dieselmotorische als auch die ottomotorische Verbrennung. Für Anwendungen mit hohem Leistungsbedarf, wie beispielsweise die Schifffahrt, sind und bleiben Verbrennungsmotoren durch ihre Kombination von hoher Leistungsdichte, hoher Effizienz und vergleichsweise geringen Kosten Teil des Hauptantriebssystems.

Methanol wurde in Kalifornien bereits während der Ölkrise als Kraftstoff für Verbrennungsmotoren untersucht. Aktuellere Beispiele für die Nutzung von Methanol als Kraftstoff sind MANs Zweitaktmotoren sowie die Stena Germanica Fähre, angetrieben von modifizierten Viertakt-Wärtsilä-Motoren. Während die genannten Beispiele diffusive Verbrennung – unterstützt durch eine geringe Diesel Pilotmenge – realisieren, sind vorgemischte Methanol-Brennverfahren mit Fremdzündung ebenfalls möglich (z.B. bei früheren IndyCars).

Dies wirft die Frage auf, welche Brennverfahren und Abgasnachbehandlungslayouts für die genannten Applikationen am besten geeignet sind. Eine kurze Zusammenfassung der Einschätzung von FEV und dem Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen (VKA) der RWTH Aachen University gibt dieser Artikel.

$p_{mi} = 21 \text{ bar}$        $n = 1.200 \text{ 1/min}$   
 $e = 18,3$                $V_h \sim 2 \text{ l}$

- Diesel @ 1.660 bar
- Methanol @ 800 bar &  $\text{CH}_3\text{OH}_{\text{Fuel}} \sim 98 \text{ \% (m/m)}$



① AGR-Variation für Methanol DDI CI und Dieselbetrieb

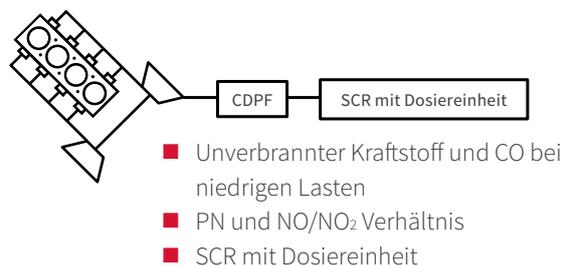
## Methanol Dual Direct Injection Compression Ignition (DDI CI)

Aufgrund des flüssigen Aggregatzustandes eignet sich Methanol gut für die Hochdruckeinspritzung und ermöglicht damit diffusive Verbrennung. Da Methanol höhere Temperaturen für die Selbstzündung erfordert als Diesel, ist entweder ein erhöhtes Verdichtungsverhältnis oder eine Zündhilfe, beispielsweise durch eine Diesel-Piloteinspritzung, erforderlich. Letztere Variante ist die attraktivere Lösung, um auch einen sicheren Kaltstart gewährleisten zu können. Dafür werden allerdings zwei Direkt-einspritzungssysteme benötigt (Dual Direct Injection – DDI). Als diffusives Brennverfahren bietet DDI CI unter anderem eine herausragende Skalierbarkeit (dazu wurden sowohl auf einem Nutzfahrzeug, als auch High-Speed Einzylinder-Motor Untersuchungen durchgeführt).

Abbildung 1 zeigt einen Vergleich zwischen Methanol DDI CI und Diesel für Nutzfahrzeugapplikationen mit Abgasrückführung. Aufgrund der diffusiven Verbrennung ist das Motorverhalten ähnlich zum Common-Rail-Dieselmotor. Die Rußemissionen sind für Methanol DDI CI auf vernachlässigbarem Niveau (Filter Smoke Number (FSN) = 0). Insbesondere durch die Verdampfungskühlung sind zudem die Verbrennungsspitzentemperaturen reduziert, was eine deutliche Absenkung der  $\text{NO}_x$ -Emissionen ermöglicht: ohne AGR um >50 Prozent. Die CO- und HC-Emissionen sind auf ähnlichem Niveau. Dementsprechend sind auch die Formaldehyd-Emissionen für das DDI CI Brennverfahren unkritisch. Darüber hinaus kann eine relative Wirkungsgradsteigerung von ~4 Prozent für diesen Fall realisiert werden.

Mit steigender AGR-Rate verändert sich das Emissionsverhalten für Methanol DDI CI in zur Diesel-Basis ähnlichen Weise. Die  $\text{NO}_x$ - und HC-Emissionen werden reduziert, während die CO-Emissionen stark ansteigen, sobald sich der Dieselmotor der Rußgrenze annähert. Für Methanol DDI CI existiert keine Ruß-Begrenzung, dennoch sorgt der Sauerstoffmangel für einen ähnlichen Anstieg der CO-Emissionen.

Ein Vergleich des Dieselbetriebs mit Methanol DDI CI bei iso  $\text{ISNO}_x$ -Bedingungen fasst die Unterschiede der Brennverfahren zusammen. Hierzu wird im Hinblick auf zukünftige Abgasgesetzgebungen ein Schwellwert von  $\text{ISNO}_x = 2 \text{ g/kWh}$  gewählt. Eine Zusammenfassung für verschiedene Betriebspunkte zeigt Abbildung 2.





Im Bestpunkt bei 1.200 1/min und BMEP ~20 bar, der auch in Abbildung 1 dargestellt ist, kann der Wirkungsgrad um ~5 Prozent gesteigert werden, während die Abgastemperatur um ~73 Kelvin reduziert wird. Die CO-Emissionen sind in beiden Fällen auf geringem Niveau. Der Dieselmotor muss zur Erreichung des ISNO<sub>x</sub>-Niveaus allerdings nahe der Rußgrenze betrieben werden (FSN = 1,6).

Bei Nennleistung (1.600 1/min, BMEP = 23 bar) zeigt sich eine ähnliche Tendenz. Der Wirkungsgrad kann um 7 Prozent gesteigert werden und die relative Änderung der HC- und CO-Emissionen sowie der Abgastemperatur bleibt ähnlich. Der Methanol-Massenanteil beträgt ~98 Prozent.

Im Drehmomentpunkt muss der Dieselmotor mit FSN ~4 und damit außerhalb der gewöhnlichen Rußgrenze betrieben werden. Hier sind die HC-Emissionen für Methanol DDI CI leicht höher als für den Dieselbetrieb, allerdings liegen beide Werte unterhalb 0,1 g/kWh.

Im Autobahnpunkt und bei hoher Teillast ist der Wirkungsgrad vergleichbar zum Dieselmotor. Die CO-Emissionen hingegen sind mit Methanol erhöht (~4 g/kWh im Autobahnpunkt; ~6 g/kWh bei hoher Teillast). Die geringere verfügbare Sauerstoffkonzentration bei hoher Teillast führt für DDI CI insbesondere im Bereich des verbrannten Pilotdiesels zu erhöhten CO-Emissionen. Ein direkter Vergleich zum Dieselbetrieb ist bei niedriger Teillast nicht möglich, da dieser Punkt von BMEP = 6 bar auf

© Emissionen und Performance für Methanol DDI CI im Motorkennfeld bei konstanter Pilotmenge und konstantem Pilottiming im Vergleich zum Dieselbetrieb

4 bar angepasst wurde, um kritischere Zustände für die Zündung bei Methanol DDI CI zu betrachten. Teilweise sind die negativen Tendenzen im HC- und CO-Emissionsverhalten und der Performance für Methanol DDI CI verglichen mit dem Dieselbetrieb in dem steigenden Dieselanteil begründet. Bei Low-Part-Load werden ~11 Prozent der Kraftstoffmasse dem Diesel zugerechnet. Die Einspritzmenge pro Arbeitsspiel bleibt dabei im gesamten Kennfeld gleich, um gleichermaßen die Zündung bei niedriger Last und Drehzahl sowie die Kühlung des Pilotinjektors bei hoher Last realisieren zu können.

Abgesehen von den unterschiedlichen Einspritzsystemen kann der Basismotor größtenteils unverändert übernommen werden. Anpassungen der Turbolader-Auslegung, wie für fremdgezündete Brennverfahren notwendig, sind nicht zwingend erforderlich. Zwar ist die Abgastemperatur niedriger, die Abgasenthalpie wird hingegen aufgrund der ~1 Prozent höheren Wärmekapazität des Abgases weniger stark reduziert. Das Abgasnachbehandlungssystem besteht weiterhin aus einem beschichteten Partikelfilter (CDPF) zur Reduzierung der PN-, HC- und CO-Emissionen insbesondere bei niedrigen Lasten. Das SCR-System kann vom Dieselmotor übernommen werden.

## Methanol DDI CI oder PFI SI – Ein direkter Vergleich für schnelllaufende Großmotoren

Für schnelllaufende Großmotoren sind sowohl vorgemischte als auch diffusive Brennverfahren vielversprechend bezüglich Emissionen und Wirkungsgrad. Welches Brennverfahren für eine spezifische Anwendung auszuwählen ist, hängt von vielen Faktoren ab. Einen entsprechenden Vergleich zeigt Abbildung 3. Dieser wurde bei 1.500 1/min,  $p_2 = p_5$ , rel. AFR = 1,8 und ohne Abgasrückführung auf dem gleichen Basismotor ermittelt.

Für Methanol DDI CI im Betrieb ohne Abgasrückführung sind die HC- und CO-Emissionen auf vernachlässigbarem Niveau.

Die  $NO_x$ -Emissionen haben ein Maximum bei 9 g/kWh, mit Potential den IMO-Tier-II-Grenzwert ohne Abgasnachbehandlung zu erreichen. Nur in Emission Control Areas (ECA) ist zur Unterschreitung des Tier-III-Grenzwerts von 2 g/kWh ein SCR-System erforderlich. Im Gegensatz dazu weist das Methanol

PFI-SI-Brennverfahren typisch für vorgemischte Verbrennung signifikante CO- und HC-Emissionen auf. Klarer Vorteil sind hingegen seine  $NO_x$ -Emissionen, die hier mit ~1 g/kWh über den gesamten Lastbereich auf sehr geringem Niveau liegen.

Der Vergleich der Wirkungsgrade zeigt, dass die Auswahl des Brennverfahrens für eine spezifische Applikation speziell von zwei Parametern abhängt: Dem Emissionsverhalten und der benötigten Lastfähigkeit. Die erzielbaren Wirkungsgrade liegen für beide Brennverfahren vor allem unter Berücksichtigung der Aufladung auf ähnlichem Niveau. Hier können beim

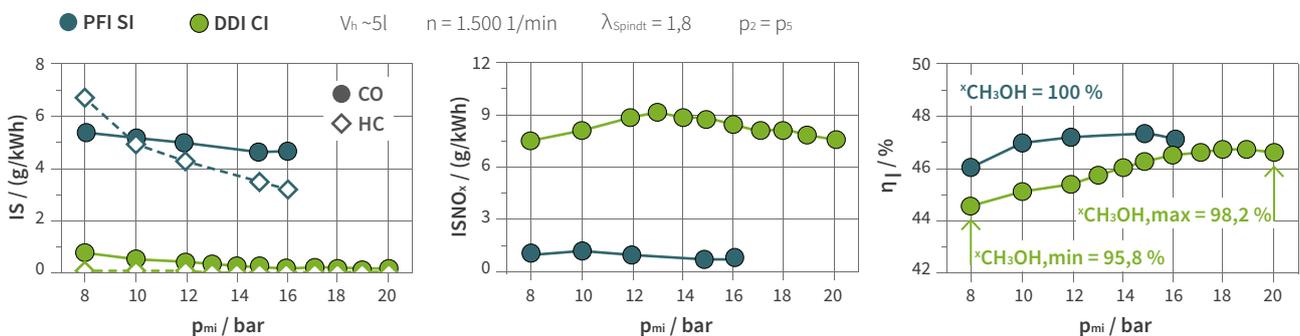
DDI CI Brennverfahren aufgrund der internen Gemischbildung größere Spülgefälle eingestellt werden. Um beim PFI SI die Lastfähigkeit zu erhöhen, müsste das Verdichtungsverhältnis reduziert werden, um Klopfen zu vermeiden. Dies wirkt sich wiederum negativ auf den Wirkungsgrad aus. Dementsprechend eignet sich das PFI SI Brennverfahren insbesondere für Applikationen mit geringen Anforderungen an die spezifische Leistung, während das komplexere DDI CI Brennverfahren grundsätzlich in allen Anwendungsbereichen möglich ist – allerdings verbunden mit entsprechend höheren Systemkosten.

Um das angesprochene Wirkungsgradverhalten detaillierter zu betrachten, zeigt Abbildung 4 Brennraten bei gleichem Verbrennungsschwerpunkt, IMEP und rel. AFR.

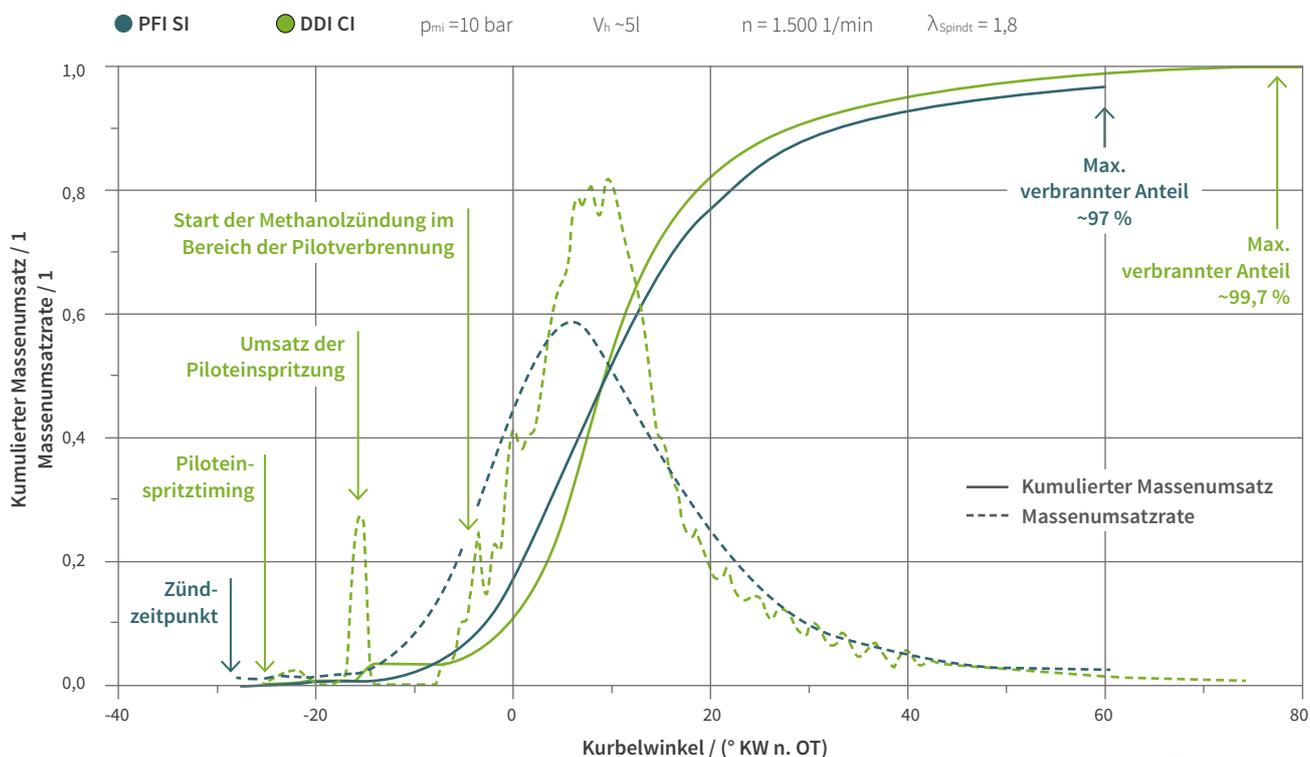
Die Wärmefreisetzungsrate für PFI SI spiegelt die Erwartungen an einen funkengezündeten Großmotor wider. Für das magere Kraftstoff-Luftverhältnis

von 1,8 ist die Brenndauer für den betrachteten Bohrungsdurchmesser vergleichsweise schnell (10 bis 90 Prozent MFB in 36° KW). Neben der schnellen Verbrennung führen insbesondere die niedrigen Temperaturen im Brennraum zu Vorteilen mit Methanol. Die Verdampfungskühlung reduziert Kompressionsarbeit und Wandwärmeverluste. Die Energie für die Kraftstoffverdampfung steht zudem anschließend für die Verbrennung zur Verfügung. Dies ist der größte Vorteil von vorgemischten Brennverfahren verglichen mit dem DDI CI Brennverfahren, bei dem der Kraftstoff nahe dem oberen Totpunkt zugeführt wird und die Verdampfungskühlung den Druck reduziert.

» BEI HOHEN SPEZIFISCHEN LEISTUNGEN IST DAS DIFFUSIVE KONZEPT ZU BEVORZUGEN, WÄHREND SICH DAS WENIGER KOMPLEXE PFI-SI-SYSTEM FÜR KOSTENFOKUSSIERTER ANWENDUNGEN ANBIETET



③ Vergleich zwischen Methanol PFI SI (links) und DDI CI (rechts)



#### ④ Brennraten für Methanol DDI CI und PFI SI

Die für das DDI CI Brennverfahren benötigte Piloteinspritzung führt zu einer frühen Wärmefreisetzung, die aus thermodynamischer Sicht unvorteilhaft ist. In der initialen Phase der Methanol-Verbrennung zünden die Strahlkeulen im Bereich der Pilotverbrennung. Die nachfolgende Zündung der anderen Strahlkeulen reduziert die maximale Wärmefreisetzungsrates aufgrund vorgemischter Verbrennung. Der Ausbrand beim DDI CI Brennverfahren ist für ein diffusives Brennverfahren relativ schnell und vergleichbar mit PFI SI. Die Brenndauer ist mit 28° KW nochmals kürzer und die Verbrennung ist nahezu vollständig.

Im Vergleich zum konventionellen Dieselmotor hat das Methanol DDI CI Brennverfahren Vorteile aufgrund der schnelleren und kälteren Verbrennung, die zusätzlich zu geringeren Wärmeverlusten führt und insgesamt eine deutliche Steigerung des Wirkungsgrads bewirkt.

#### Von

Arne Güdden · guedden@vka.rwth-aachen.de  
Dr. José Geiger · geiger\_j@fev.com

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

### Zusammenfassung

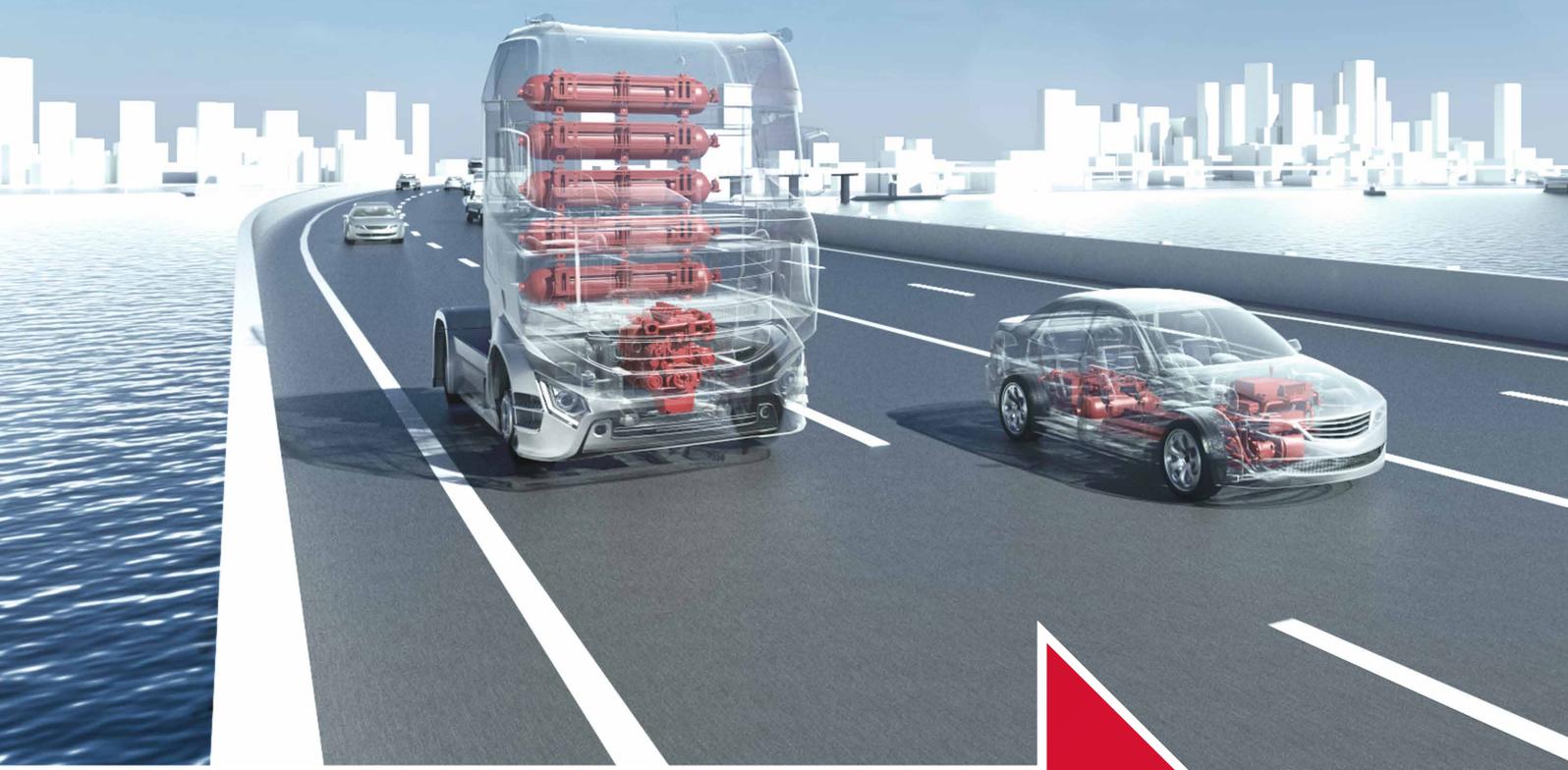
Zusammengefasst bieten sich zwei Methanol Brennverfahren an: Die vorgemischte, funkengezündete (PFI/DI SI) und die diffusive Dual Direct Injection Compression Ignition (DDI CI) Verbrennung. Das DDI CI Brennverfahren ist abgesehen von den offensichtlichen Unterschieden sehr ähnlich zum konventionellen Dieselmotor, weist allerdings signifikante Vorteile bezüglich des erreichbaren Wirkungsgrads und der Rußemissionen auf, insbesondere bei durch Abgasrückführung erzielten niedrigen NO<sub>x</sub>-Emissionen. Das vorgemischte PFI SI Brennverfahren ist ähnlich zu aktuellen Erdgasmotoren, allerdings mit erhöhtem Wirkungsgradpotential. Abhängig von der Anwendung ist eine magere Betriebsweise (schnelllaufende Großmotoren) oder ein stöchiometrischer Betrieb mit Dreibegekatalsator (Nutzfahrzeugmotoren) zielführend. Im direkten Vergleich haben sowohl das DDI CI als auch das PFI SI Brennverfahren ihre spezifischen Vorteile. Bei hohen spezifischen Leistungen ist das diffusive Konzept zu bevorzugen, während sich das weniger komplexe PFI SI System für kostenfokussierte Anwendungen anbietet.

Die in diesem Artikel gezeigten Ergebnisse wurden in einem Projekt erzielt, welches durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Deutschland (Förderkennzeichen 19I18006P) gefördert wurde. Der Inhalt des Artikels liegt in der Verantwortung der Autoren.



## H2-ICE

WIE DIE TRANSIENTE PERFORMANCE DES  
WASSERSTOFFMOTORS BEI GLEICHZEITIG NIEDRIGSTEN  
NO<sub>x</sub>-EMISSIONEN VERBESSERT WERDEN KANN



EMISSIONEN  
IM TRANSPORTSEKTOR





**D**ie CO<sub>2</sub>-Emissionen sind maßgeblich für die zunehmende Erderwärmung in den letzten Jahrzehnten verantwortlich. Um die Ziele des Pariser Klimaabkommens zu erreichen und die globale Erwärmung unter +1,5 °C zu halten, hat die Europäische Kommission strenge Reduktionsziele festgelegt.

Bis 2050 soll eine CO<sub>2</sub>-neutrale Wirtschaft erzielt werden, was bedeutet, dass der Transportsektor seine Emissionen innerhalb der nächsten 30 Jahre um 90-95 Prozent reduzieren muss.

Deshalb ist es notwendig, alle verfügbaren Technologien zu nutzen und jeden Aspekt der Fahrzeugtechnologie zu optimieren. Die OEMs müssen aus diesem Grund eine Kombination von Maßnahmen einsetzen<sup>(1)</sup>. Um die CO<sub>2</sub>-Emissionsziele zu erfüllen, sind nicht nur die technischen Herausforderungen erheblich, sondern auch die damit verbundenen Entwicklungs- und Produktkostensteigerungen werden eine Rolle bei der Aufrechterhaltung der Rentabilität spielen. Der Einsatz von Wasserstoff wird eine wichtige Rolle spielen, um die Dekarbonisierung der Automobilindustrie zu erreichen.

Wasserstoffbasierte Antriebe sollten Änderungen an der bestehenden Antriebstechnologie auf ein Minimum beschränken. Die Umrüstung eines bestehenden Verbrennungsmotors für den Betrieb mit Wasserstoff zeigt die besten Aussichten. Die Änderungen an der bekannten Motorhardware sind minimal und bieten somit eine zuverlässige und kostengünstige Lösung für die Umsetzung von CO<sub>2</sub>-neutralen Langstrecken-Transportlösungen. In Verbindung mit einer optimierten Abgasnachbehandlung lassen sich gleichzeitig extrem niedrige NO<sub>x</sub>-Emissionen erreichen.

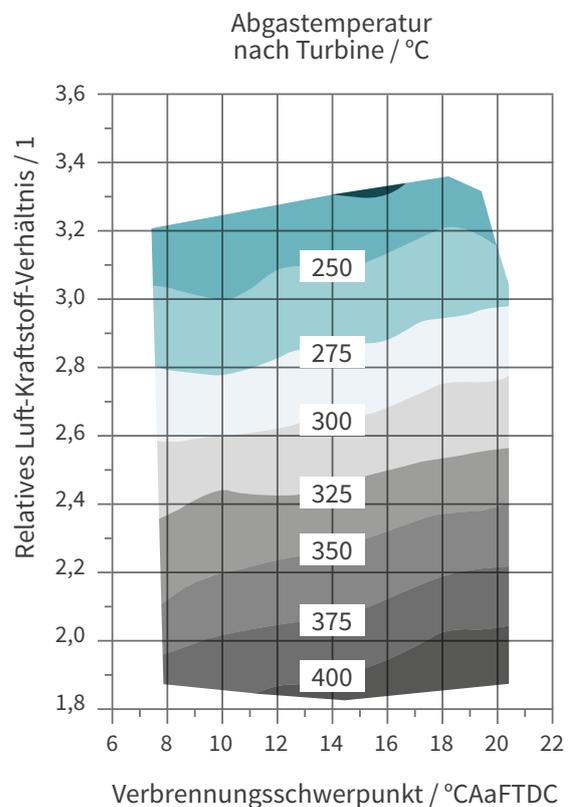
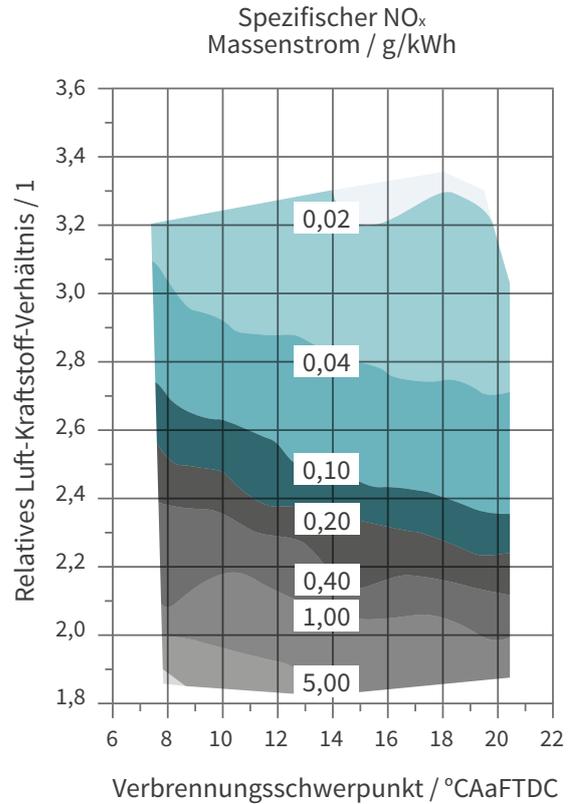
### Motorprüfstandsversuche an einem Wasserstoffvollmotor

Ergebnisse aus Simulationen und Einzylinder-Motorentests wurden genutzt, um einen 7,7 Liter Serien-Mehrzylinder-Gasmotor in einen Wasserstoffmotor umzubauen. Der Demonstrator ist mit einem zweistufigen Aufladesystem ausgestattet, das den ursprünglichen am Erdgasmotor eingesetzten einstufigen Turbolader ersetzt. Dies ermöglicht den Betrieb mit mageren Luft-Kraftstoff-Verhältnissen auch bei hohen Lastanforderungen. Um diesel- und erdgasmotorähnliche effektive Mitteldruckwerte zu erreichen, wurde auch das Kolbendesign optimiert, um einen klopf- und vorzündungsfreien Betrieb ohne signifikante Reduzierung des Motorwirkungsgrades zu gewährleisten. Es wurde ein effektiver Mitteldruck von 19,6 bar und ein Motorwirkungsgrad von fast 42 Prozent erreicht. Außerdem konnte mit 220 kW die gleiche Motorleistung wie bei den Diesel- und Erdgasvarianten erreicht werden.

Die bei der ottomotorischen Verbrennung von Wasserstoff entstehenden NO<sub>x</sub>-Emissionen hängen hauptsächlich vom relativen Luft-Kraftstoff-Verhältnis und der Verbrennungsschwerpunktlage ab. Erwartungsgemäß führen sowohl erhöhte Luft-Kraftstoff-Verhältnisse als auch spätere Verbrennungsschwerpunktlagen zu geringeren NO<sub>x</sub>-Emissionen. Um niedrigste NO<sub>x</sub>-Tailpipe-Emissionen zu erreichen, ist eine Kombination aus niedrigen NO<sub>x</sub>-Rohemissionen und einem hohen Wirkungsgrad der Abgasnachbehandlung erforderlich. Ein magereres Luft-Kraftstoff-Verhältnis senkt die NO<sub>x</sub>-Rohemissionen, führt aber auch zu niedrigeren Abgastemperaturen, was – je nach Betriebspunkt – zu einer verminderten Reduktionseffizienz eines SCR-Katalysators führen kann. Auf der anderen Seite bringt ein nach spät verlagerter Verbrennungsschwerpunkt einen Vorteil für die NO<sub>x</sub>-Rohemissionen bei etwas höheren Abgastemperaturen. Dies ist allerdings mit Nachteilen beim Motorwirkungsgrad verbunden, Abbildung 1 verdeutlicht dieses Verhalten für einen stationären Betriebspunkt (1.400 min<sup>-1</sup>, 8 bar BMEP).

Die Ergebnisse der stationären Untersuchungen zeigen, dass der trade off zwischen NO<sub>x</sub>-Rohemissionen, Motorwirkungsgrad und Abgasnachbehandlungsleistung mit der Steuerung des Luft-Kraftstoff-Verhältnisses und der Verbrennungsschwerpunktlage optimiert werden kann.

① NO<sub>x</sub>- und Abgastemperaturniveau in Abhängigkeit vom Luft-Kraftstoff-Verhältnis und Verbrennungsschwerpunktlage.



TEST KONFIGURATION	ZIEL-LAMBDA	ZIEL-CoC*	ZÜNDWINKELVERSTELLUNG WÄHREND LASTSPRUNG	REDUKTION DER NO <sub>x</sub> -ROHEMISSIONEN
1	2.0	≈8° CAaTDC	Basis	-
2	2.3	≈8° CAaTDC	Basis	≈75 %
3	2.3	≈8° CAaTDC	Basis x2	≈83 %

② Test-Konfigurationen für die Emissionszyklen (WHTC)

\*CoC = Center of Combustion (Verbrennungsschwerpunktage)

## Emissionsverhalten im transienten Motorbetrieb

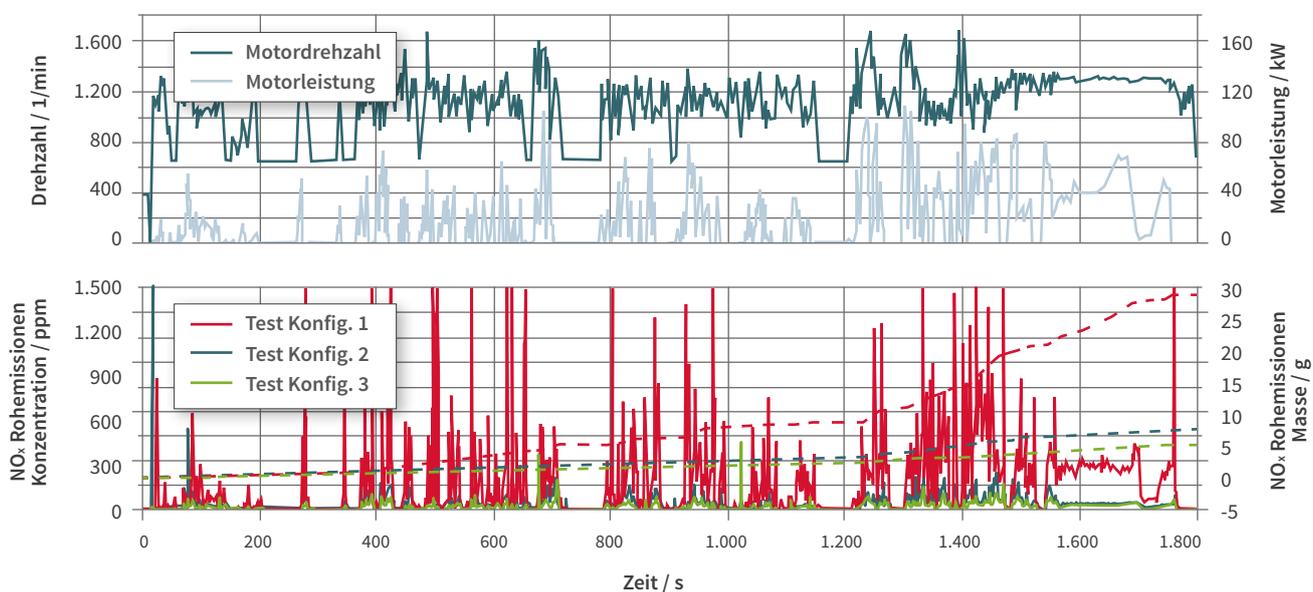
Zur Demonstration des NO<sub>x</sub>-Reduktionspotenzials während transienter Betriebsphasen wurden Hotstart-Emissionszyklen (WHTC) durchgeführt. Der Fokus liegt hier auf dem Vergleich von drei Testkonfigurationen. Abbildung 2 zeigt die Hauptunterschiede zwischen den Testkonfigurationen und die damit verbundenen Auswirkungen auf die NO<sub>x</sub>-Rohemissionen.

Wie bereits gezeigt, ist der Einfluss des Luft-Kraftstoff-Verhältnisses auf die NO<sub>x</sub>-Emissionen signifikant. Darüber hinaus kann eine Spätverstellung der Zündung die maximalen NO<sub>x</sub>-Konzentrationen reduzieren. Bei schnellen Lastanforderungen unterstützt eine Absenkung des Luft-Kraftstoff-Verhältnisses einen schnellen Lastaufbau. Um daraus resultierende hohe NO<sub>x</sub>-Emissionen und klopfende Verbrennung während eines schnellen Lastanstiegs zu vermeiden, sollte der Zündzeitpunkt nach spät gestellt werden. Diese Spätverstellung hat einen negativen Einfluss auf den Wirkungsgrad des Motors. Durch die Verwendung eines angepassten Regelalgorithmus ist es möglich, den optimalen Trade off zwischen Motorwirkungsgrad und niedrigen NO<sub>x</sub>-Rohemissionen zu gewährleisten. Abbildung 3 zeigt den Einfluss der Testkonfiguration auf die WHTC-NO<sub>x</sub>-Rohemissionen.

Bei mageren Luft-Kraftstoff-Verhältnissen kann das NO<sub>x</sub>-Niveau um 75 Prozent reduziert werden, wobei die daraus resultierende niedrigere Abgastemperatur ein Nachteil für die Abgasnachbehandlung darstellt. Zusätzlich können NO<sub>x</sub>-Emissionenspitzen reduziert und das Gesamt-NO<sub>x</sub>-Niveau über eine Verstärkung des Zündwinkelrückzugs bei vergleichbarem Abgastemperaturniveau um weitere 35 Prozent reduziert werden.

Attraktive NO<sub>x</sub>-Rohemissionswerte können mit spezifischen Werten von 0,51 g/kWh über einen Hotstart WHTC erreicht werden. Durch dieses niedrige Rohemissionsniveau bietet der Wasserstoffverbrennungsmotor gute Voraussetzungen in Kombination mit einer effektiven Abgasnachbehandlung auch niedrigste Emissionsgrenzwerte hinsichtlich der Stickoxidemissionen zu erreichen.

③ Vergleich der NO<sub>x</sub>-Rohemissionen im WHTC mit den drei verschiedenen Testkonfigurationen



Für einen Wasserstoffmotor können verschiedene Nachbehandlungskonfigurationen in Betracht gezogen werden. Da Selective Catalytic Reduction (SCR) ein hohes Reduktionspotenzial bietet (bei optimalen Temperaturbedingungen bis zu 100 Prozent Umwandlungswirkungsgrad), wäre dies eine bevorzugte Lösung. Allerdings muss die Zusammensetzung des Abgases berücksichtigt werden. Der Wassergehalt im Abgas von Wasserstoffmotoren ist im Vergleich zu Dieselmotoren deutlich erhöht. Bei relativen Luft-Kraftstoff-Verhältnissen zwischen 2 und 3 beträgt die Wasserkonzentration etwa 15-20 Prozent. Somit bildet ein Standard-Kupfer-Zeolith nicht die optimale Basis, da dieses Substrat, durch einen erhöhten Wassergehalt verstärkt, altern könnte.

Darüber hinaus sollte die gewählte SCR-Beschichtung bei niedrigen bis mittleren Temperaturen ihren optimalen Betriebsbereich haben. Beim Wasserstoffmotor liegt der zu erwartenden Temperaturbereich nicht über 500°C, so dass keine Notwendigkeit für eine Hochtemperatur-NO<sub>x</sub>-Reduktionsleistung oder Beständigkeit gegen Hochtemperaturalterung besteht. Außerdem werden im Abgas eines Wasserstoffmotors keine signifikanten Konzentrationen von Kohlenwasserstoffen (HC) vorhanden sein, so dass eine mögliche Vergiftung durch HC bei der Auswahl des Substrats vernachlässigt werden kann.

Um das Potenzial und die Herausforderungen des Nachbehandlungssystems weiter zu bewerten, wurde ein Hotstart WHTC gefahren und analysiert. Die Vorkonditionierung erfolgte wie im Zertifizierungsverfahren mit einem Vorkonditionierungs-WHTC

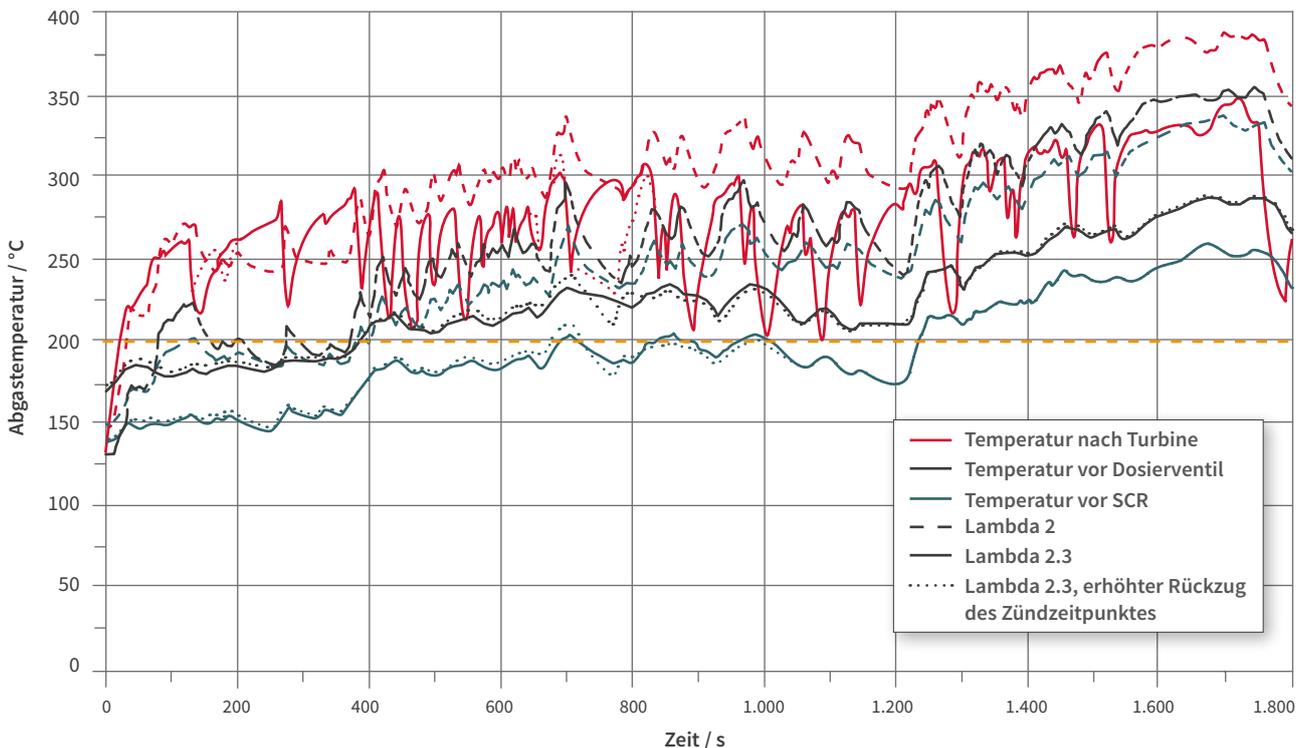
und 10 Minuten Soak Time. Die Temperaturverläufe der warmen WHTCs mit den verschiedenen Kalibrierungen sind in Abbildung 4 dargestellt.

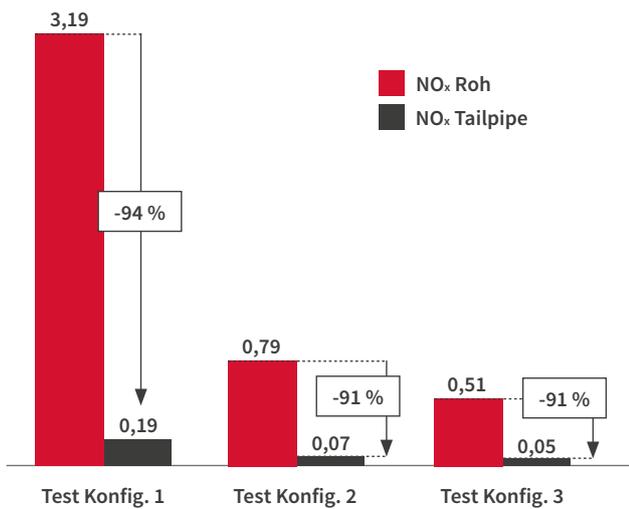
Wie bereits gezeigt, führt die Erhöhung des relativen Luft-Kraftstoff-Verhältnisses zu einer Absenkung der Abgastemperatur, während die verstärkte Spätverstellung des Zündzeitpunkts kaum Auswirkungen auf die Temperaturen hat.

Bei einer Harnstoff-Dosierfreigabe bei 200°C würde die Dosierung bei einem Ziel-Lambda von 2 nach weniger als 100 Sekunden beginnen. Bei Erhöhung des Ziel-Lambda auf 2,3 wird die Abgastemperatur verringert, so dass ca. 400 Sekunden bis zur Dosierfreigabe benötigt werden. Allerdings werden gleichzeitig die Rohemissionen stark abgesenkt und nach der etwas längeren Aufheizphase ebenfalls Temperaturen erreicht, bei denen hohe SCR-Wirkungsgrade erreicht werden können. In diesem Fall überwiegt der Vorteil durch die verringerte Rohemission den Nachteil der niedrigeren Temperaturen.

Mit den Temperaturen und Raumgeschwindigkeiten wurden die erreichbaren SCR-Konvertierungswirkungsgrade mit einem kennfeldbasierten Modell berechnet, das für einen Standard-SCR kalibriert wurde. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5 dargestellt.

④ Vergleich der Abgastemperaturen im WHTC mit den drei verschiedenen Testkonfigurationen.





© Simulierte SCR-Wirkungsgrad und resultierende Tailpipe-Emissionen für ein SCR-Abgasnachbehandlungssystem

Die höheren Abgastemperaturen der ersten Versuchskonfiguration führen zu einer früheren Harnstoffdosierung und erhöhten SCR-Wirkungsgraden, die wiederum zu einer NO<sub>x</sub>-Gesamtreduktion von ca. 94 Prozent führen. Bei einem relativ hohen NO<sub>x</sub>-Rohemissionsniveau von 3,19 g/kWh können Emissionen von ca. 190 mg/kWh erreicht werden.

Für die Testkonfigurationen 2 und 3 kann der gleiche SCR-Wirkungsgrad von 91 Prozent erreicht werden, da die getroffene Maßnahme (verstärkter Zündwinkelrückzug) nicht den hohen Einfluss auf die Temperatur haben, die der Haupttreiber für den SCR-Wirkungsgrad ist. Der verstärkte Zündwinkelrückzug bewirkt aber die erwartete Reduktion der Rohemissionen bei schnellen Lastwechseln und dadurch der Tailpipe-Emissionen von 70 mg/kWh auf 50 mg/kWh.

#### Von

Dr. Lukas Virnich · virnich@fev.com

Dieter van der Put · van-der-put@fev.com

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

#### Quelle:

(1) Van der Put, D., et al.: Efficient Commercial Powertrains – How to Achieve a 30% GHG Reduction in 2030, In: Proceedings of the FISITA 2020 World Congress, Prague, 14-18 September 2020

Die größte Herausforderung bei der Behandlung der NO<sub>x</sub>-Emissionen eines Wasserstoffmotors besteht darin, das Luft-Kraftstoff-Verhältnis und den Zündzeitpunkt mit der Abgasnachbehandlung abzustimmen, um moderate NO<sub>x</sub>-Rohemissionen zu erreichen und gleichzeitig ausreichende Abgastemperaturen für die Abgasnachbehandlung sicherzustellen.

Die bereits erzielten Ergebnisse ohne vollständige Optimierung zeigen das große Potenzial eines Wasserstoff-Verbrennungsmotors zur Darstellung sehr niedriger NO<sub>x</sub>-Emissionen. Zur weiteren Verbesserung hat FEV einen Regelalgorithmus entwickelt, um eine optimale Abstimmung von Kalibrierung und Abgasnachbehandlung für geringste Emissionen und/oder Dynamik zu erreichen. Die Leistung des Abgasnachbehandlungssystems wird durch diesen Algorithmus ständig modelliert und kann Einfluss auf den Motorbetrieb nehmen.

# H<sub>2</sub>

## Zusammenfassung

Wenn hohe konstante Leistung und weniger transienter Fahrzeugbetrieb gefordert sind, stellt ein mit Wasserstoff betriebener Verbrennungsmotor einen kostengünstigen Ansatz dar, um CO<sub>2</sub>-freien Langstreckentransport bei langer Lebensdauer mit bewährter Technik zu realisieren. Auch in anderen Anwendungen kann ein Wasserstoff-Verbrennungsmotor niedrige Schadstoffemissionen in Verbindung mit attraktiven Motorwirkungsgraden bieten.

Die NO<sub>x</sub>-Emissionen, die der kritischste Faktor bei der Wasserstoffverbrennung sind, können mit richtig ausgewählten und dimensionierten Abgasnachbehandlungssystemen und speziellen Regelalgorithmen auf sehr niedrige Werte reduziert werden. WHTC-Tests zeigten ein großes Potenzial, auch die transienten NO<sub>x</sub>-Rohemissionen durch eine geeignete Kombination von Luft-Kraftstoff-Verhältnis-Einstellung und Zündzeitpunkt-Verstellung zu reduzieren. Die Ergebnisse der WHTC-Messungen und Simulationen des Abgasnachbehandlungssystems zeigten, dass Emissionswerte von 50-70mg/kWh in einem warmen WHTC als erreichbar angesehen werden können. Mit weiterer Optimierung und Abstimmung von Kalibrierung und Nachbehandlungssystem kann der Wasserstoffmotor erfolgreich in Richtung eines nahezu emissionsfreien Antriebssystems entwickelt werden.

## KOMPONENTEN-UMWELTTESTS – EINZIGARTIGE PRÜFKAPAZITÄT

Hochvoltbatterien, Elektronik- und weitere Fahrzeugkomponenten sind in ihrem Lebenszyklus verschiedensten Umwelteinflüssen ausgesetzt. FEV unterstützt Hersteller und Zulieferer mit einem neuen, umfassenden Prüfparcours rund um den Faktor Umwelt.

Im neuen eDLP (e-Dauerlaufprüfzentrum), dem weltweit größten Entwicklungs- und Testzentrum für Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs in Sandersdorf-Brehna, stellt FEV auf einer Gesamtfläche von 42.000 m<sup>2</sup> rund 70 Anlagen für Performance-, Lebensdauer-, Abuse-Tests etc. zur Verfügung.

Auf circa 2.500 m<sup>2</sup> decken 15 Stationen alle gängigen Umweltprüfungen ab. Dabei stehen insbesondere die Anforderungen nach ISO 16750 (Road Vehicles -- Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment) sowie die UN-Norm 38.3 zum Nachweis der Transporttauglichkeit im Mittelpunkt. Außerdem ist das Verhalten von Batterien und Elektronikkomponenten mit Blick auf Gewährleistungszusagen ein wichtiger Aspekt für eDLP-Kunden. Darüber hinaus können im eDLP auch Kompo-

ponenten anderer Fahrzeugbaugruppen die Umwelttests durchlaufen. FEVs Expertenteam am eDLP berät und unterstützt bei der Spezifikation individueller Prüfziele, bei Bedarf werden auch geeignete Prüfzyklen entwickelt und deren Ausführung übernommen. Daten aus der Befundung und Fehlerermittlung

### » FEVS EXPERTENTEAM AM eDLP BERÄT UND UNTERSTÜTZT BEI DER SPEZIFIKATION INDIVIDUELLER PRÜFZIELE

werden dabei direkt in den Entwicklungsprozess der Kunden zurückgespielt. Das verkürzt nicht nur virtuelle Iterationsschleifen, sondern reduziert auch Realtests. Und spart damit auf dem Weg zur Produktserienreife Zeit und Kosten.

#### Die Umweltprüfungen am eDLP:

- › **Klimaprüfungen/Betauung:** Klimaschrank und Temperatorkammern für Temperatur- und Luftfeuchteprofile zwischen -40 und 90°C sowie 10 bis 95 Prozent rel. Feuchtigk.
- › **Chemische Beständigkeit:** Klima- und Temperatorkammern zur Prüfung der allgemeinen Widerstandsfähigkeit von Werkstoffen gegen die Einwirkung von Chemikalien bei unterschiedlichen Temperatur- und Luftfeuchteprofilen zwischen -40 und 90°C sowie 10 bis 95 Prozent rel. Feuchtigk.
- › **Schwallwasser:** Temperatorkammer mit Schwallwasseranlage (Eiswasser, Schmutzwasser) für thermische Schocks
- › **Korrosionsprüfung/Salznebel:** Klimakammern mit Salznebelsprühanlagen für unterschiedliche Temperatur- und Luftfeuchteprofile
- › IP-Schutzart: Staub, starkes Strahlwasser, Heißwasser usw.
- › **Staubprüfung:** Staubkammer mit hoher Luftumwälzung zur Nutzung mit nach SAE J726 genormtem Arizona Road Dust oder Talkumpulver
- › **Tauchbecken:** zwei gemauerte Tauchbecken mit je 14 m<sup>3</sup> Volumen, in denen Prüflinge bis zu einem Meter tief versenkt werden können
- › **Unterdruckprüfung:** Vakuum-Temperatorkammer für wechselnde Luftdruckverhältnisse
- › Steinschlag: Multisteinschlagprüfgerät mit Hartguss-Granulat

Dimensionierung und Leistungsprofile der einzelnen Prüfanlagen sind auf maximale Flexibilität und die Anforderungen sämtlicher in Europa, Asien und den USA gängigen Prüfnormen ausgelegt. Wie alle Prüfstände im eDLP laufen die Umwelttests im 24/7-Betrieb, was eine schnellstmögliche Abarbeitung der Projekte und den kontinuierlichen Informationsfluss an die Kunden jederzeit sicherstellt. Optional können sich Auftraggeber in Echtzeit auf ausgewählte Prüfstände aufschalten lassen und Testläufe ihres Produkts live mitverfolgen. Nach dem Abschluss von Prüfzyklen besteht außerdem die Möglichkeit, virtuell auch bei der Befundung dabei zu sein: So können Ergebnisse direkt ausgetauscht und gemeinsam mit den eDLP-Experten Lösungsansätze oder nächste Schritte abgestimmt werden.



Mehr Informationen unter  
[edlp.fev.com](https://edlp.fev.com)



TAUCHBECKEN  
MIT **14 M<sup>3</sup>**  
VOLUMEN



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



## IMPRESSUM

SPECTRUM Nr. 72 · Ausgabe 01/2021

Redaktion

Marius Strasdat · FEV Europe GmbH

Gestaltung

Hannah Peña Gómez · FEV Consulting GmbH

Übersetzung

EVS Translations



## 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](mailto:spectrum@fev.com)



## FEV IM INTERNET

Besuchen Sie uns online:

[www.fev.com](http://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](http://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 410 507 · Indien

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