Porsche Engineering
MAGAZIN

KUNDEN & MÄRKTE Zukünftige Mobilitätskonzepte, Digitalisierung und elektrischer Fahrspaß
PORSCHE HAUTNAH Mehr Effizienz und Performance mit dem neuen Porsche 911 Carrera
ENGINEERING INSIGHTS Ein intelligentes Steuergerät für Elektro- und Hybridfahrzeuge

AUSGABE 2/2015

www.porsche-engineering.de

FRISCHER WIND

Aerodynamik-Entwicklung der Zukunft

Porsche empfiehlt Mobil 1 und MICHELIN

Elektrifiziert.
Mit Batterietechnologie von Porsche Engineering.

Porsche gewinnt die FIA WEC Weltmeisterschaft 2015

Porsche Engineering
driving technologies

PORSCHE

Dirk Lappe und Malte Radmann,
Geschäftsführer von Porsche Engineering

Über Porsche Engineering

Zukunftsweisende Lösungen sind der Anspruch, den Ferdinand Porsche bereits im Jahr 1931 mit der Gründung seines Konstruktionsbüros verfolgt hat. Er legte damit den Grundstein für die heutige Porsche-Kundenentwicklung. Dem fühlen wir uns mit jedem Projekt, welches wir für unsere Kunden durchführen, verpflichtet.

Das Leistungsspektrum von Porsche Engineering reicht von der Konzeption einzelner Komponenten bis hin zur Planung und Durchführung von Gesamtfahrzeugentwicklungen und wird über den Automobilbereich hinaus auch in andere Branchen übertragen.

Liebe Leserinnen, liebe Leser,

_____ die Entwicklungen und Veränderungen in der Automobilindustrie sind von Schnelllebigkeit geprägt – im Zuge der Digitalisierung mehr denn je. Wie wir bei Porsche Engineering die aktuellen Herausforderungen der Mobilität einschätzen und mit rapiden Veränderungen umgehen, um für Sie die Lösungen für morgen entwickeln zu können, erfahren Sie im Interview „Elektrisch. Effizient. Emotional.“

Auch die Gründung unserer neuen Tochtergesellschaft im rumänischen Cluj stellt eine wichtige Weichenstellung für die Zukunft dar. Dadurch stärken und erweitern wir unsere Kompetenzen im Bereich Softwareentwicklung und bieten Ihnen zukünftig noch intensiver die Möglichkeit, mit uns als Entwicklungspartner die Digitalisierung der Fahrzeugentwicklung voranzutreiben.

Das Fokusthema dieser Ausgabe widmet sich im Detail der Aerodynamik-Entwicklung und zeigt, dass diese in Zukunft eine noch wichtigere Rolle spielen wird. Erfahren Sie mehr über die Potenziale der frühen Entwicklungsphasen sowie die erstklassigen Prüf- und Testeinrichtungen von Porsche, die Ihnen auch für Ihre Projekte zur Verfügung stehen.

Nicht zuletzt erwarten Sie in dieser Ausgabe erneut „Engineering Insights“ sowie alle Informationen zum neuen Porsche 911 Carrera.

Wir wünschen Ihnen eine interessante Lektüre und viel Spaß beim Lesen!

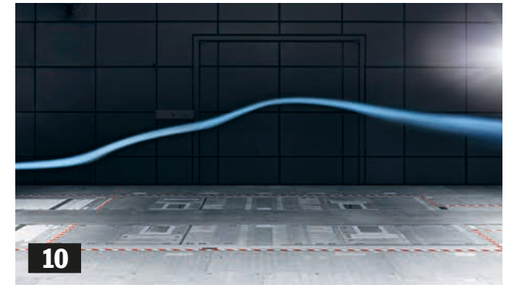
Ihr Malte Radmann und Ihr Dirk Lappe

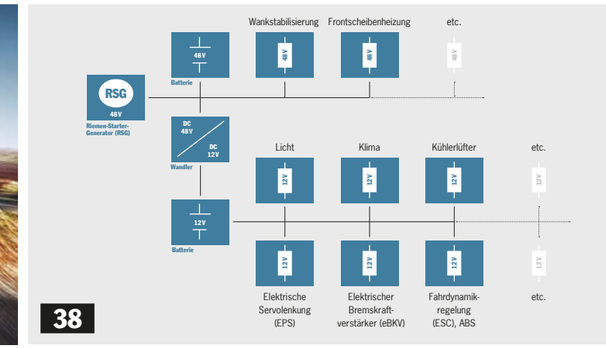
911-MODELLE (TYP 991 II)
Kraftstoffverbrauch (kombiniert):
9,0 – 7,4 l/100 km;
CO_2-Emission (kombiniert):
208 – 169 g/km;
Effizienzklassen: F – D

28

KUNDEN & MÄRKTE
ELEKTRISCH. EFFIZIENT. EMOTIONAL.

Dirk Lappe, Technischer Geschäftsführer von Porsche Engineering, über zukünftige Mobilitätskonzepte, Digitalisierung sowie elektrischen Fahrspaß.





AERODYNAMIK-ENTWICKLUNG

10 Früh und effizient
Optimierungspotenziale in der frühen Phase der Aerodynamik-Entwicklung

14 Essenziell und anspruchsvoll
Michael Pfadenhauer, Porsche AG, zur steigenden Bedeutung der Aerodynamik

16 Präzise und flexibel
Der aeroakustische Windkanal im Entwicklungszentrum Weissach

20 Zukunftsweisend und einzigartig
Dr. Hauke Stumpf, Porsche AG, über den neuen Windkanal

KUNDEN & MÄRKTE

22 e-generation
Ein Forschungsprojekt mit positiver Bilanz

28 Elektrisch. Effizient. Emotional.
Im Gespräch mit Dirk Lappe, Technischer Geschäftsführer von Porsche Engineering

PORSCHE HAUTNAH

32 Der neue Porsche 911 Carrera
Alle wichtigen Details

ENGINEERING INSIGHTS

38 Dynamische Bordnetzsimulation
Das zentrale Nervensystem des Fahrzeugs

44 Intelligent gesteuert
Entwicklung eines Steuergeräts für Elektro- und Hybridfahrzeuge

03 Editorial
06 News
49 Impressum

911 CARRERA-MODELLE (TYP 991 II)
Kraftstoffverbrauch (kombiniert): 9,0 – 7,4 l/100 km;
CO_2-Emission (kombiniert): 208 – 169 g/km;
Effizienzklassen: F – D

News

NEUE TOCHTERGESELLSCHAFT: PORSCHE ENGINEERING ROMANIA SRL

___ Porsche Engineering baut seine Kompetenzen im Bereich der Digitalisierung weiter aus. In der Universitätsstadt Cluj-Napoca wurde zu diesem Zweck die Tochtergesellschaft Porsche Engineering Romania SRL gegründet. Rumänien und insbesondere die Universitätsstadt Cluj-Napoca gehören zu den innovativsten Regionen für Softwareentwicklungen in Europa. Eine Vielzahl von IT-Unternehmen hat hier ihren Ursprung und es existiert eine lebendige Start-up-Szene. Diese Umgebung stellt für Porsche Engineering einen idealen Nährboden für innovative Entwicklungen im Automobilbereich dar. „Cluj wird dazu beitragen, dass wir die Digitalisierung des Fahrzeugs weiter vorantreiben“, erläutert Malte Radmann, Vorsitzender der Geschäftsführung von Porsche Engineering. „Hierfür benötigen wir erstklassige Softwareingenieure, die wir in Cluj finden.“ Durch den ständigen Austausch der Ingenieure an den unterschiedlichen Standorten im In- und Ausland wird die Gesamtfahrzeug-Kompetenz damit in idealer Weise ergänzt. ■

News

EIN SPORTLICHES JAHR

MITARBEITER MEISTERN SPORTLICHE HERAUSFORDERUNGEN

___ Die Mitarbeiter von Porsche Engineering sind neben der Arbeit auch sportlich fit. Das stellten sie in 2015 gleich bei mehreren Gelegenheiten unter Beweis: Beim 6. Bietigheimer BZ-Firmenlauf, der im Juli stattfand, belegte das Porsche Engineering-Team einen erfolgreichen 3. Platz in der Gesamtmannschaftswertung. Wenige Wochen später stellten sich die Porscheaner am Nürburgring der Herausforderung „Rad am Ring“ und gingen in den Kategorien „Mountainbike“ und „Rennrad“ in 24-Stunden-Rennen gemeinsam mit mehr als 5000 weiteren Radsportlern an den Start. Zudem nahmen Porsche Engineering-Mitarbeiterteams am Fußballturnier von Porsche Leipzig sowie am „Porsche 6-Stunden-Lauf“ teil. Bei den letzten beiden Events stand jeweils der gute Zweck im Vordergrund. ■

EINE RUNDE SACHE

VIELE HIGHLIGHTS IM NARDÒ-JUBILÄUMSJAHR

___ Geprägt von vielen Highlights, geht das Jubiläumsjahr von Nardò zu Ende. Pünktlich zum Gründungstag vor 40 Jahren ging am 1. Juli 2015 die überarbeitete Website des Prüf- und Testgeländes in neuem Porsche-Design online. Die Seite präsentiert das breit gefächerte Angebot an Teststrecken und Erprobungsdienstleistungen in neuer Struktur und Optik. Im Rahmen der Automotive Testing Expo Europe 2015 in Stuttgart wurde neben Rekordfahrzeugen auch der neue Nardò-Imagefilm präsentiert und Interessenten die Möglichkeit gegeben, das zukunftsorientierte Prüf- und Testgelände in Form einer „Augmented Reality“-Anwendung zu erkunden. Abschließend erfuhren internationale sowie regionale Journalisten bei einem Pressetermin vor Ort in Nardò Hintergrundinformationen zu den laufenden Weiterentwicklungsmaßnahmen des Geländes. ■

www.porsche-nardo.com

WELTREKORD AUFGESTELLT

ERFOLGREICHE SAISON FÜR DAS STUTTGARTER GREENTEAM

___ Das GreenTeam der Universität Stuttgart, das seit 2011 von Porsche Engineering unterstützt wird, kann mit der vergangenen Saison mehr als zufrieden sein: Nachdem das Team bereits beim Konstruktionswettbewerb „Formula Student Germany“ am Hockenheimring im August diesen Jahres den dritten Platz erreicht hatte, stellten die Studentinnen und Studenten einige Wochen später mit ihrem E0711-5 beim Jade-Race in Mariensiel einen neuen Weltrekord auf: Dem GreenTeam-Elektrorennwagen gelang hier die Beschleunigung von 0 auf 100 km/h in nur 1,779 Sekunden. Der Formelrennwagen, der über ein Monocoque aus Karbonfaser und Fahrwerksteile aus Aluminium und Titan verfügt und dessen Steuergeräte und Hochvoltakkus Eigenfertigungen sind, schaffte es damit ins Guinness-Buch der Rekorde. ■

911 TURBO CABRIOLET
Kraftstoffverbrauch
innerorts: 13,4 l/100 km
außerorts: 7,8 l/100 km
kombiniert: 9,9 l/100 km
CO_2-Emission (kombiniert): 231 g/km
Effizienzklasse: G

FRISCHER WIND

___ Die Aerodynamik-Entwicklung ist eine klassische Disziplin der Automobilentwicklung, die heute mehr denn je das Gesamtsystem Fahrzeug beeinflusst. Erfahren Sie im Folgenden, welche Optimierungspotenziale die frühe Phase der Aerodynamik-Entwicklung für den Produktentstehungsprozess mit sich bringt, welche Anforderungen die Aerodynamik-Entwicklung in Zukunft am stärksten prägen werden und wie der neue aeroakustische Windkanal im Entwicklungszentrum Weissach optimales und realitätsgetreues Testen ermöglicht.

FRÜH UND EFFIZIENT

Optimierungspotenziale in der frühen Phase der Aerodynamik-Entwicklung

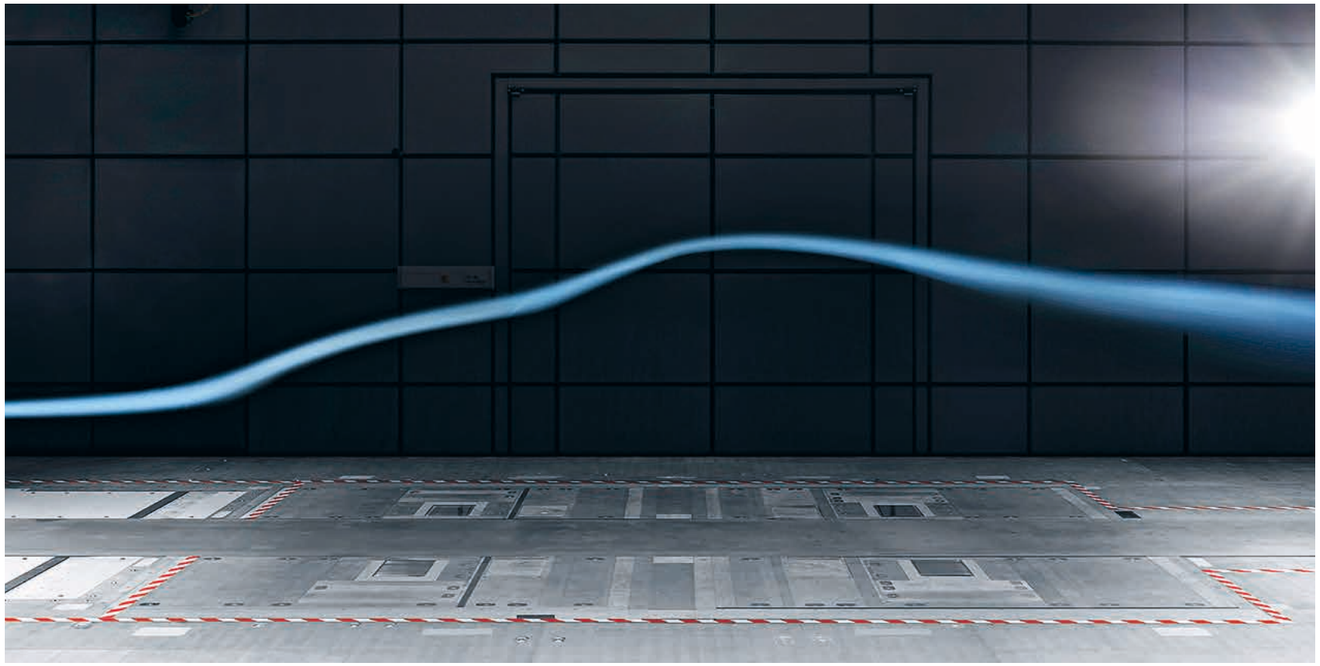
____ Optimale Aerodynamik spielt bei Porsche-Sportwagen eine zentrale Rolle – seit jeher. Bereits bei den ersten Porsche-Fahrzeugen wurde viel Wert auf eine gute Aerodynamik gelegt. Dies trug auf den Rennstrecken trotz vermeintlich unterlegener Fahrzeuge zu zahlreichen Erfolgen bei. Und nicht nur Porsche-Modelle werden von den Ingenieuren für erstklassiges Aerodynamikverhalten ausgelegt, sondern auch die Fahrzeuge anderer Hersteller und Branchen. Insbesondere die frühe Phase der Aerodynamik-Entwicklung bietet dabei besondere Effizienzpotenziale.

Von Thomas Aussem und Marcel Straub

Die auf ein Fahrzeug wirkenden aerodynamischen Kräfte sind enorm. Sie wachsen mit der Fahrgeschwindigkeit im Quadrat und erreichen bei rund 250 km/h einen Wert, der beispielsweise bei einem Flugzeug zum Abheben führt. Die Aufgabe des Automobil-Aerodynamikers besteht bei performanceorientierten Fahrzeugen nun darin, diese Kräfte für den Abtrieb zu nutzen, um damit Kurvengeschwindigkeiten und Fahrstabilität zu erhöhen. Gleichzeitig wird für geringe Verbräuche, niedrige CO_2-Werte und hohe Endgeschwindigkeiten der Luftwiderstand so weit wie möglich reduziert.

Die Aerodynamik hat maßgeblichen Einfluss darauf, ob ein Fahrzeug die gesetzten Ziele erreicht. Neue Prüfzyklen, neue Anforderungen im Bereich Elektromobilität und die weitere Verschärfung der gesetzlichen Rahmenbedingungen lassen die Bedeutung eines niedrigen Strömungswiderstands in Zukunft weiter wachsen.

Porsche Engineering bietet den Kunden im Bereich Aerodynamik die Möglichkeit, das Wissen aus der Sportwagenentwicklung auf ihre Projekte zu übertragen. Die Fahrzeugpalette ist dabei nicht nur auf Sportwagen beschränkt. Von der kompakten Limousine bis zum SUV profitieren alle Klassen von den langjährigen Erfahrungen der Ingenieure. Dabei erwartet den Kunden ein auf seinen Bedarf individuell zugeschnittener Entwicklungsprozess, der den Zugriff auf die gesamte aerodynamische Prüflandschaft des Entwicklungszentrums Weissach einschließt. Die Projektumfänge reichen von Consulting über Unterstützung bei Messungen bis hin zur kompletten Übernahme der aerodynamischen Entwicklungsverantwortung.



Dieser visualisierte Luftstrom lässt eine vertraute Silhouette erkennen.

Aerodynamik ist mehr als nur der c_W-Wert

Der Luftwiderstand ist die zentrale Größe der heutigen Aerodynamik-Entwicklung von Fahrzeugen und stellt ab einer Geschwindigkeit von 80 km/h den dominierenden Teil der Fahrwiderstände dar. Als dimensionsloser Beiwert ist der c_W-Wert ein Maß für die aerodynamische Formgüte eines Fahrzeuges und ermöglicht den direkten Vergleich unterschiedlicher Fahrzeuggrößen und -klassen.

Eine weitere aerodynamische Angabe ist der Auftriebsbeiwert c_A, der sich auf Vorder- und Hinterachse aufteilt. Damit werden die von der umströmten Fahrzeugkontur erzeugten Auf- oder Abtriebskräfte bewertet. Doch nicht nur deren Absolutwerte sind entscheidend. Besonders wichtig für die Fahrdynamik ist eine ausgewogene aerodynamische Balance, also die Verteilung der Kräfte auf Vorder- und Hinterachse, um vor allem bei hohen Geschwindigkeiten eine hervorragende Fahrstabilität zu erzielen.

Aus diesen klassischen Disziplinen hat sich eine Vielzahl an weiteren Aufgabenfeldern entwickelt, in denen die Aerodynamik direkten Einfluss auf den Entwicklungsprozess nimmt (siehe Abbildung auf Seite 12). Insbesondere die enge Verknüpfung von Aero- und Thermodynamik sei hier erwähnt. Alle der Kühlung und Belüftung zugedachten Luftströme haben eine direkte Auswirkung auf die aerodynamische Gesamtperformance des Fahrzeuges. Meistens sind diese Sekundärströmungen verlustbehaftet. Deshalb gilt der Grundsatz: So viel wie nötig, so wenig wie möglich.

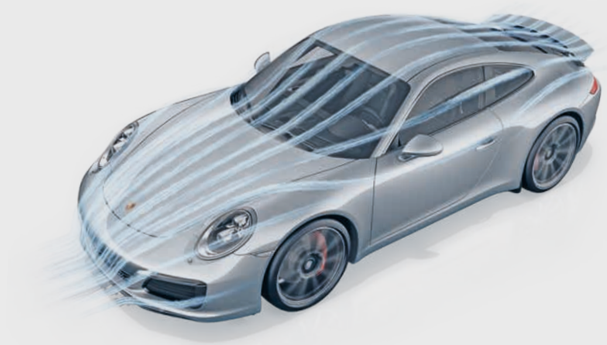
Zwar sind die Herausforderungen der Aerodynamik-Entwicklung stetig gestiegen, aber die Entwicklungswerkzeuge hielten Schritt und sind allen heutigen Aufgaben gewachsen. So kann Porsche auf eine einzigartige Aerodynamik-Prüflandschaft zurückgreifen. Neueste Errungenschaft ist ein Aerodynamik- und Akustik-Windkanal für Fahrzeuge im Maßstab 1:1, der auch die Straßensimulation erlaubt (siehe Artikel „Präzise und flexibel“ ab Seite 16). Der neue Windkanal ist seit dem Frühjahr 2015 im Serieneinsatz und hilft dabei, die Herausforderungen von morgen zu meistern. Zusätzlich stehen im Entwicklungszentrum Weissach ein 1:1-Fahrzeugwindkanal ohne Straßensimulation sowie ein Windkanal für Aerodynamikmodelle im Maßstab 1:3 zur Verfügung. Auch externe Kunden können diese Ressourcen über Porsche Engineering nutzen. Abgerundet wird die Palette der Entwicklungswerkzeuge mit dem Einsatz von numerischen Strömungssimulationen (CFD – Computational Fluid Dynamics). Hier werden digitale Aerodynamikmodelle mit einem sehr hohen Detaillierungsgrad und vielen Millionen Zellen erstellt, berechnet und ausgewertet. Akkurate Ergebnisse sind dank moderner Rechner-Cluster über Nacht verfügbar.

Aerodynamik in der frühen Projektphase

Besondere Relevanz für die Aerodynamik-Entwicklung hat die frühe Phase eines jeden Fahrzeugprojektes. Hier kann zusammen mit der Styling-Abteilung noch umfangreich Einfluss auf die Fahrzeugform genommen werden, um die aerodynamischen Ziele zu erreichen. Innerhalb definierter Randbedingungen herrschen noch große Freiheitsgrade bei der Optimierung des Grundkörpers, die eingebrachten Änderungen im Bereich der Außenhaut bleiben dabei meist kostenneutral. Um die aerodynamischen Potenziale in einem Projekt auszuschöpfen und die gesteckten Zielwerte zu erreichen, muss schnell, flexibel und kostengünstig auf die verschiedenen ›

DIE VIELFÄLTIGKEIT DER AERODYNAMIK: HERAUSFORDERUNGEN UND ZIELE

- Luftwiderstand
- Auftriebsbalance
- Motorkühlung
- Aggregatebelüftung
- Verschmutzung
- Bauteilkräfte
- Zugfreihaltung
- Aeroakustik



Veränderungen im Projekt reagiert werden. Porsche Engineering setzt hier auf einen integrierten Aerodynamikprozess aus realen Messungen und Optimierungen im 1:3-Modellwindkanal einerseits sowie virtuellen CFD-Simulationen andererseits. Die komplementären Vorteile der beiden Methoden können so optimal kombiniert werden.

Das 1:3-Aerodynamikmodell bietet die Möglichkeit, in kürzester Zeit optimierende Formänderungen aufzumodellieren und ihre Wirkung im Windkanal zu bewerten. Sowohl der Effekt auf die aerodynamischen Beiwerte, vor allem aber auch der optische Einfluss auf das Design des Fahrzeugs können gemeinsam mit dem Stylisten beurteilt werden. Bis zu 30 unterschiedliche Modellkonfigurationen lassen sich so an einem Tag untersuchen. Die Verwendung eines skalierten Modells hat zwei Vorteile: Zum einen können beim Modellaufbau sowie bei den Windkanalkosten im Vergleich zum 1:1-Vollmodell erhebliche Kosten eingespart werden, zum anderen wird die Windkanalzeit mit dem 1:3-Modell deutlich besser ausgenutzt, da Änderungen schneller umsetzbar sind.

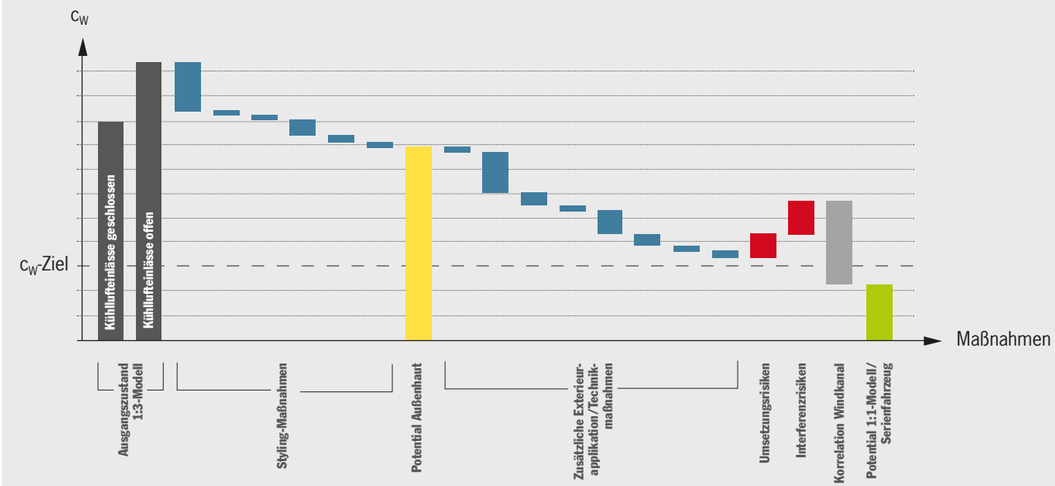
Gerade in einer frühen Projektphase entstehen zumeist mehrere Styling-Varianten parallel. Das Erstellen einer großen Anzahl von Windkanalmodellen für jeden dieser Entwürfe wäre sehr teuer und die Reaktionszeiten vom Datenrelease bis zur Bewertung wären zu lang – hier spielt die CFD-Simulation ihre Stärken aus. Auf dem vorbereiteten digitalen Plattformdatensatz lassen sich die Stylingentwürfe schnell auswechseln und somit effizient bewerten. So können bereits in der sehr frühen Projektphase die aerodynamischen Potenziale der diversen Stylingvarianten beurteilt werden.

Optimierung am Windkanalmodell

Beim Modellaufbau spielt vor allem das Kosten-Nutzen-Verhältnis eine Rolle, ausschlaggebend ist dabei der Detaillierungsgrad der Modelle. Der Porsche-Modellbau kann dabei alles darstellen: von einem einfachen Schaumkörper bis hin zur komplexen Durchströmkarosserie (DSK) mit einer Clay-Außenhaut zur Modellierung von Formoptimierungen, ebenso mit Drucksonden bestückte Modellkühler und die Abbildung der Motorraumdurchströmung sowie eines detailgetreuen Unterbodens. Gemäß den Zielen des Kunden wird ein Modellmix erarbeitet, der unter den vorgegebenen Budgetbedingungen einen optimalen Nutzen für die Aerodynamik ergibt.

Die größten Vorteile der Entwicklung mit skalierten Modellen liegen in der Flexibilität und den Freiheitsgraden im Windkanal. Innerhalb weniger Minuten ist eine Formänderung definiert und vom erfahrenen Modelleur auf das Aerodynamikmodell übertragen. Das Feedback im Windkanal erfolgt unmittelbar. Die Beiwertveränderungen können online bewertet werden und in die nächste Konfigurationsänderung mit einfließen.

ZIELWERTTREPPE (SCHEMATISCHE DARSTELLUNG)



Doch nicht nur Optimierung durch Auf- oder Abtragen von Clay ist machbar, auch die Wirkung von Anbauteilen wie beispielsweise Spoiler oder Flügel lässt sich unmittelbar ermitteln. So können bereits in einer frühen Phase die aerodynamische Effizienz von Maßnahmen bewertet und Konzeptentscheidungen unterstützt werden.

Die Ergebnisse aus CFD-Simulationen unterstützen auch hier die Arbeit im Windkanal. Die virtuelle Entwicklungsmethode spielt dabei ihre enormen Vorteile in Sachen Strömungsvisualisierung aus. Strömungsablösungen, Wirbelstrukturen, Druck- und Geschwindigkeitsverteilungen können aus nahezu jeder erdenklichen Sichtposition und Schnittlage genauestens analysiert werden. Auch Sensitivitätsanalysen etwa zu Hecklängen, Heckhöhen oder Front- und Heckscheibenwinkeln lassen sich dank eines Morphing-Tools schnell umsetzen. Die Erkenntnisse können dann auf das 1:3-Windkanalmodell zur zielgerichteten Optimierung angewendet werden. Im Ergebnis entsteht ein aerodynamisch optimiertes Fahrzeugmodell. Die Maßnahmen können nun mit Stylisten oder Entwicklungsingenieuren direkt am Modell besprochen werden. Zusätzlich wird im Rahmen einer Modellabtastung etwa durch einen 3D-Laserscanner das Modell beispielsweise der Styling-Abteilung sowie den technischen Fachabteilungen elektronisch zur Verfügung gestellt. Aus einer Fülle an Optimierungspotenzialen entsteht nun eine Prognose auf den Zielwert des späteren Serienfahrzeugs (siehe auch oben stehende Illustration). Hierbei werden bereits Maßnahmen wie zum Beispiel für Unterbodenverkleidungen und Kühlerjalousien berücksichtigt, die zu einem späteren Zeitpunkt am 1:1-Windkanalfahrzeug detailliert entwickelt werden.

Das Ziel der Optimierung im Windkanal und bei der CFD-Simulation ist es, die erarbeiteten Verbesserungen im Projekt umzusetzen. Häufig müssen dabei neue Lösungen mit anderen technischen Fachbereichen und der Styling-Abteilung gefunden werden. Auch dies zählt zum Angebotsumfang von Porsche Engineering: Porsche-Ingenieure mit langjährigen Erfahrungen unterstützen mit ihrem Prozesswissen den Kunden direkt vor Ort bei der Vertretung der Vorschläge in Entscheidungsgremien sowie bei der Umsetzung der definierten Maßnahmen, um am Ende das beste Gesamtpaket zu erzielen.

Fazit

Auch in Zukunft werden die Anforderungen an die Aerodynamik weiter steigen. Es gilt, CO_2-Emissionen und Verbrauch durch Verminderung des Luftwiderstands weiter zu reduzieren und gleichzeitig Abtrieb, Fahrverhalten und Komfort optimal zu gestalten. Die Aerodynamiker von Porsche Engineering begegnen diesen Herausforderungen mit der intelligenten Kombination aus numerischer Strömungssimulation und realer Messung – und nicht zuletzt mit der Erfahrung aus der Entwicklung von Sportwagen. ■

ESSENZIELL UND ANSPRUCHSVOLL

____ Im Gespräch mit Michael Pfadenhauer, Leiter Aerodynamik/Thermomanagement bei der Porsche AG, über die besonderen Herausforderungen an die Aerodynamik aufgrund von neuen Technologien und der sich ständig verändernden Fahrzeuganforderungen.

Wie haben sich die Anforderungen an die Aerodynamik-Entwicklung verändert?

Michael Pfadenhauer Die Anforderungen an die Aerodynamik sind vielfältiger und anspruchsvoller geworden. Genügte es vor ein paar Jahren noch, ein mit Sondermaßnahmen ausgestattetes Modell mit niedrigem c_W-Wert zu präsentieren, stehen heute der Flottenverbrauch und damit die Gesamtbetrachtung aller Modelle – insbesondere die verkaufsstarken Modelle – im Fokus. Ergänzt wird dies durch technische Fragestellungen mit Schwerpunkt auf Performance, Komfort, Leichtbau und Komplexität bei regelbaren Elementen und nicht zuletzt durch starken Kostendruck bei umzusetzenden Lösungen sowie ein ausgeprägtes Gefühl und Verständnis für die optische Anmutung von aerodynamischen Elementen: Niemand akzeptiert mehr Lösungen, die entweder schön oder aerodynamisch sind, die Erwartung ist, dass Premiumprodukte immer beide Aspekte optimal darstellen. Insofern steht die Aerodynamik mehr denn je mit im Zentrum einer gelungenen Fahrzeugentwicklung, und das bei einer zunehmenden Anzahl von Ansprechpartnern und Fragestellungen. Das genau macht den Reiz aus und die stets neuen Anforderungen in einer klassischen Entwicklungsdisziplin so spannend.

Welche Rolle spielt in Zukunft die Simulation?

Pfadenhauer Ohne Simulationen sind wir schon heute nicht mehr arbeitsfähig. Insofern sind die Fähigkeiten, Software effizient einzusetzen und richtig zu interpretieren, Kernkompetenzen, ohne die eine Aerodynamik-Entwicklung schon heute nicht mehr denkbar ist. Schnelle Abläufe im Aufbau der Modelle und beim Rechnen selbst sowie ausreichende Verfügbarkeit von Soft- und Hardwareressourcen sind ebenso entscheidend wie eine intelligente Vernetzung mit den ebenfalls nötigen klassischen Versuchsmethoden. Nicht umsonst hat Porsche sowohl im Rechnerbereich mit dem Supercomputer-Hersteller Cray und den Softwarelieferanten langfristige Kooperationsverträge abgeschlossen und dabei gleichzeitig in den Neubau unseres aeroakustischen Windkanals investiert. Damit sind wir in der Lage, verlässliche Untersuchungsergebnisse zu liefern, lange bevor es Hardware gibt. In frühen Phasen können nun zielgerichtet Entscheidungen getroffen werden, und zwar dort, wo Änderungen noch einen beherrschbaren Aufwand an Zeit und Kosten verursachen. Und nur auf diese Weise sind auch hardwarefreie Projektphasen effizient zu bearbeiten. Zukünftig wird sich die Bedeutung der Simulation noch weiter verstärken – eine rein virtuelle Entwicklung wird es aber nach meiner Einschätzung nicht geben können.

Michael Pfadenhauer

Michael Pfadenhauer (47) studierte Luft- und Raumfahrttechnik an der Technischen Universität in München. Nach seinem Abschluss als Diplom-Ingenieur war er zehn Jahre lang in leitender Funktion im Bereich Aerodynamik bei Audi in Ingolstadt tätig. Im Jahr 2005 kam er zu Porsche und verantwortet hier seither den Entwicklungsbereich Aerodynamik/Thermomanagement.

„Die Aerodynamik-Entwicklung steht mehr denn je mit im Zentrum einer gelungenen Fahrzeugentwicklung."

Was sind die besonderen Anforderungen an die Aerodynamik bei Porsche-Fahrzeugen?

Pfadenhauer Wir entwickeln Fahrzeuge mit besonderen Ansprüchen für besondere Kunden. Die gleichzeitige Erfüllung aller Porsche-typischen, gegensätzlichen Wertepaare wie Tradition und Innovation, Performance und Alltagstauglichkeit, Exklusivität und soziale Akzeptanz sowie Design und Funktionalität bringt die hohen Ansprüche auf den Punkt. Wir wollen Produkte entwickeln, die gleichzeitig verbrauchsarm und performant sind, also niedrigen Luftwiderstand – für geringen Verbrauch – und gleichzeitig hohen Abtrieb – für hohe Performance auf der Rundstrecke – haben. Die Physik koppelt leider beides in einer ungünstigen Art, sodass bei hohen Abtrieben zwangsweise ein hoher Luftwiderstand entsteht. Wir könnten uns damit zufriedengeben, dass es halt so ist. Tun wir aber nicht. Die Lösung hierfür lautet bei Porsche adaptive Aerodynamik, also die gezielte Verstellung der Aerodynamik auf den jeweiligen Fahrerwunsch bzw. Betriebsmodus. Das bedeutet niedrigen Luftwiderstand, wenn sparsam gefahren werden soll, und Abtrieb, wenn auf der Rundstrecke Performance gefragt ist. Unsere Fahrzeuge können beides – und das macht den Unterschied und einen Teil des Erfolges von Porsche aus. Das Gleiche gilt natürlich auch für das Design: Beides muss den Premiumanspruch in vollem Maße erfüllen, um als Premiumprodukt am Markt wahrgenommen zu werden und bestehen zu können.

„Zukünftig wird sich der Stellenwert der Simulation noch weiter verstärken."

Inwieweit stellen elektrifizierte Fahrzeuge die Aerodynamik-Entwicklung vor neue Herausforderungen?

Pfadenhauer Aufgrund der besonderen Eigenschaften von elektrischen Antrieben in Automobilen verschieben sich die Verlustanteile der zum Antrieb des Fahrzeugs benötigten Energie. Der Verbrennungsmotor als hohe Verlustquelle fällt weg, damit treten die Gesamtfahrzeugverluste, wie zum Beispiel Rollwiderstand und insbesondere für schnellere, elektrifizierte Fahrzeuge der Luftwiderstand, in den Vordergrund. Hinzu kommt, dass dem Fahrzeuggewicht aufgrund der Rekuperationsmöglichkeiten weniger Bedeutung beigemessen werden kann. Daraus folgt: Die Aerodynamik nimmt bei solchen Fahrzeugen eine noch wichtigere Rolle als bei konventionellen Fahrzeugen ein und ist damit ein wichtiger Stellhebel für Verbrauch und Reichweite und damit für den Erfolg des Produktes. Dies ist allen Herstellern bewusst, und wenn man genau hinsieht, sind fast alle elektrischen Fahrzeuge mit besonderen aerodynamischen Lösungen versehen. Wir beschäftigen uns auch mit diesem Thema, aber wenn wir es umsetzen, dann natürlich mit einer Porsche-typischen Lösung. Seien Sie also gespannt, was wir uns haben einfallen lassen. ■

PRÄZISE UND FLEXIBEL

Der neue aeroakustische Windkanal im Entwicklungszentrum Weissach

____ Im Frühjahr 2015 wurde der neue aeroakustische Windkanal im Entwicklungszentrum in Weissach in Betrieb genommen. Zusammen mit dem Elektronik-Integrationszentrum und dem Design-Studio mit Konzeptbau setzen die drei Gebäude neue Maßstäbe für die zukunftsorientierte Fahrzeugentwicklung „engineered and designed in Weissach“. Die Kernziele des neuen Windkanals liegen dabei besonders in einer energieeffizienten Aerodynamik, noch höherer Fahrsicherheit und noch mehr Fahrkomfort für zukünftige Fahrzeuggenerationen.

Bereits mit dem in Weissach bisher genutzten Windkanal konnten sehr genaue aerodynamische Messungen durchgeführt werden. Mit dem neuen, seit dem Frühjahr 2015 in Betrieb befindlichen aeroakustischen Windkanal sind aber noch realitätsnähere Versuche möglich. Wichtigster Grund hierfür: Während die Prototypen im alten Kanal fest auf einer Stelle standen, „fahren“ sie jetzt, und zwar auf einem Bandsystem, welches sich unter dem eingespannten Fahrzeug befindet. Es simuliert die Relativbewegung des Autos zur Straße mit einer Geschwindigkeit von bis zu 300 km/h. So kann der Luftstrom unter dem Fahrzeug im realen Fahrbetrieb noch besser getestet werden. Gerade hier im Unterbodenbereich des Fahrzeugs und in den Radhäusern besteht noch erhebliches Potenzial, die Effizienz und Fahrstabilität durch bessere Aerodynamik zu erhöhen.

Kombinierte Bandsysteme

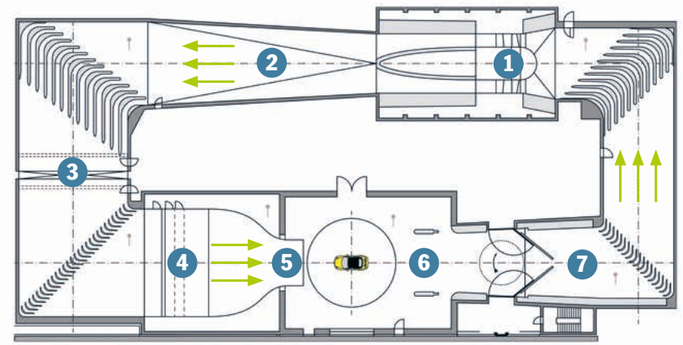
Das Bandsystem mit Waage bildet das Herzstück des neuen Windkanals. Eine Besonderheit in Weissach: Die Testingenieure können zwischen zwei verschiedenen Bandsystemen wählen. Bei dem einen, dem Fünfbandsystem, steht jedes Rad auf einem eigenen Stahlband, in der Mitte läuft ein großes Band unter dem Fahrzeugboden, wodurch noch exakter gemessen werden kann. Das Einbandsystem besteht, wie der Name schon verrät, aus einem einzigen Stahlband, das unter dem Prüfling bewegt wird. Es kommt der Realität auf der Straße am nächsten, was für viele Untersuchungen große Vorteile hat, liefert aber etwas weniger exakte Ergebnisse. Nach dem Motto „Nimm zwei!“ hat sich Porsche dafür entschieden, beide Messprinzipien in einer Anlage zu kombinieren. Innerhalb weniger Stunden können die mehr als 20 Tonnen wiegenden Bandsysteme mithilfe eines Kransystems ausgetauscht werden.

Die Bandsysteme haben aber noch eine weitere entscheidende Aufgabe: Sie ermöglichen die Messung der Kräfte, mit denen der Wind auf das Fahrzeug einwirkt. Denn sie sind mit einer auf einem eigenen Fundament stehenden Präzisionswaage verbunden. Damit werden minimale Veränderungen der Windkräfte am Fahrzeug bzw. deren Verteilung über ›

911 TURBO CABRIOLET
Kraftstoffverbrauch
innerorts: 13,4 l/100 km
außerorts: 7,8 l/100 km
kombiniert: 9,9 l/100 km
CO_2-Emission (kombiniert): 231 g/km
Effizienzklasse: G

Ein 911 Turbo Cabriolet steht im sogenannten Plenum auf einem Fünfbandsystem.

Mithilfe zahlreicher Mikrofone werden auch Akustikmessungen durchgeführt.



Aufbau des neuen aeroakustischen Windkanals

1 Gebläse 2 Hauptdiffusor 3 Wärmetauscher 4 Vorkammer 5 Düse 6 Plenum 7 Diffusor

die Räder gemessen. Daraus können die Ingenieure den Luftwiderstand und die Auf- bzw. Abtriebskräfte an Vorder- und Hinterachse zurückrechnen.

Geschlossener Luftkreislauf

Der Windkanal ist in der sogenannten Göttinger Bauart ausgeführt (siehe oben). Das bedeutet, dass der von einem starken Gebläse erzeugte Luftstrom in einem geschlossenen Kreis geführt wird – das sorgt für geringeren Energiebedarf. Eine Düse vor der eigentlichen Messstrecke beschleunigt den Wind sechsfach, der sich an die Messstrecke anschließende Diffusor verlangsamt ihn wieder. Die durch die Luftreibung entstehende Wärme führt ein gewaltiger Wärmetauscher ab. Erzeugt wird der künstliche Wind von einem großen Gebläse mit Schaufeln aus Carbon, welches einen Durchmesser von etwa acht Metern hat. Die von einem Elektromotor in der Größe eines Kleinbusses stammende maximale Antriebsleistung beträgt rund sieben Megawatt, also 9300 PS. Viele der Messungen, etwa zur Bestimmung des Luftwiderstands, finden auch künftig bei autobahnüblichen 140 km/h statt. Trotzdem ist es wichtig, deutlich höhere Windgeschwindigkeiten erzeugen zu können – etwa für Strukturfestigkeitsversuche oder die Rennsportentwicklung.

Detektivische Akustikmessungen

Dennoch geht es im neuen Kanal recht still zu: Bei 200 km/h ist die Anlage erheblich leiser als ihr Vorgänger. Damit ist es nun möglich, in Weissach auch solche Akustikmessungen durchzuführen, für die man in der Vergangenheit auf externe Dienstleister ausweichen musste. Dabei geht es weniger um das absolute Geräuschniveau als um detektivische Detailarbeit: Wie beeinflusst zum Beispiel eine bestimmte Spiegelkontur oder eine neue Türdichtung das Klangbild? Einige Hundert Mikrofone werden für solche Messungen so auf das in der Messstrecke stehende Fahrzeug gerichtet, dass sich anschließend am Rechner eine Darstellung der dreidimensionalen Schallausbreitung vom Fahrzeug erzeugen lässt. ■

ZUKUNFTSWEISEND UND EINZIGARTIG

____ Dr. Hauke Stumpf, Leiter Prüffeld in der Entwicklung der Porsche AG, erläutert die Besonderheiten des neuen Windkanals.

Was sind die Merkmale, die den neuen Windkanal so besonders machen und ihn vom bisherigen Windkanal unterscheiden?

Dr. Hauke Stumpf Durch die Bodensimulation mit laufendem Band sind wir mit unseren Messungen jetzt deutlich näher an der Realität auf der Straße. Hierbei können wir sowohl das Fünfbandsystem als auch das Einbandsystem verwenden. Damit können wir flexibel auf unterschiedliche Anforderungen eingehen und gleichzeitig unser Hauptziel erreichen: Präzision. Wir müssen Kraftänderungen in der Größenordnung von einem Newton genau erfassen können – mit dem neuen Windkanal sind wir dazu in der Lage. Darüber hinaus gilt: Es gibt bisher nicht viele Automobil-Windkanäle, die 300 km/h Windgeschwindigkeit bei einem so großen Strömungsquerschnitt und einer solchen Strömungsqualität ermöglichen. Für uns als Sportwagenhersteller ist das aber auch besonders wichtig, denn unsere Fahrzeuge erreichen diese Geschwindigkeiten, auch auf dem Rundkurs …

Bevor ein Windkanal in Betrieb genommen werden kann, muss auch dieser erst einmal auf seine Aufgabe vorbereitet werden. Was gilt es hierbei zu beachten?

Stumpf Bei nahezu allen Komponenten handelt es sich um Spezialanfertigungen, die nur von wenigen Lieferanten weltweit beherrscht werden. Und genau wie man ein Musikinstrument vor dem Konzert stimmt, muss auch ein Windkanal zunächst selbst genau geprüft und eingestellt werden. Ein Expertenteam prüfte beispielsweise wochenlang die Verteilung des Luftstroms in der Messstrecke. Denn damit die Ergebnisse verwertbar sind, dürfen in dem Raum die Strömungsparameter nur um weniger als ein Prozent schwanken. Zu unserer großen Freude liegen wir deutlich darunter.

Inwiefern ist der neue Windkanal für die Anforderungen der Automobilentwicklung der Zukunft gerüstet?

Stumpf Ein derartiges Wechsel-Bandsystem wurde in unserem neuen Windkanal weltweit erstmalig realisiert. Daraus ergibt sich nicht nur die Möglichkeit, ein Fahrzeug in ein und derselben Windkanalröhre mit unterschiedlichen Bodensimulationen zu messen und die Ergebnisse zu vergleichen, darüber hinaus werden wir auch zukunftssicherer: Sollte es in den nächsten Jahren bzw. Jahrzehnten substanzielle Weiterentwicklungen der Bodensimulationsmethoden geben, hätten wir grundsätzlich die Möglichkeit, mit einem zusätzlichen oder veränderten Systemaufsatz zu reagieren. In einem klassischen Windkanal, wie unserem seit 1986 bestehenden, ist das baulich gar nicht vorgesehen. Wenn man da umbauen will, muss man die Anlage für lange Zeit außer Betrieb nehmen. Das wäre für die Fahrzeugentwicklung mit den kontinuierlichen Messbedarfen sehr problematisch. Mit unserem Konzept des Wechsel-Bandsystems sind wir viel flexibler.

> *„Genau wie man ein Instrument vor dem Konzert stimmt, muss auch ein Windkanal zunächst selbst genau geprüft und eingestellt werden."*

Welche Vorteile ergeben sich aus dem Gebäudeensemble, das Werkstätten, Design und Aerodynamik-Entwicklung umfasst?

Stumpf Durch die räumliche Nähe können die Aerodynamik-Entwickler Designstudien unter höchster Geheimhaltungsstufe sehr schnell testen. Schließlich wird der Windkanal zwischen einem frühen Entwicklungsstadium bei Designstudien bis zur Prüfung von serienreifen Fahrzeugen immer wieder eingesetzt. Zudem begünstigt die räumliche Nähe die Zusammenarbeit verschiedener Disziplinen nicht nur technisch, sondern auch menschlich. ■

Dr. Hauke Stumpf

Dr. Hauke Stumpf (48) studierte Maschinenbau mit Schwerpunkten in Leichtbau und Strömungsmechanik an der Technischen Universität in Darmstadt sowie an der Cornell University, New York. Er promovierte im Rahmen seiner Forschung zu Composite-Materialien in Hamburg und Paris. Nach langjähriger Tätigkeit in leitenden Funktionen in einem großen luftfahrttechnischen Betrieb kam Dr. Stumpf im Jahr 2006 zu Porsche und ist heute Leiter Prüffeld im Entwicklungszentrum Weissach.

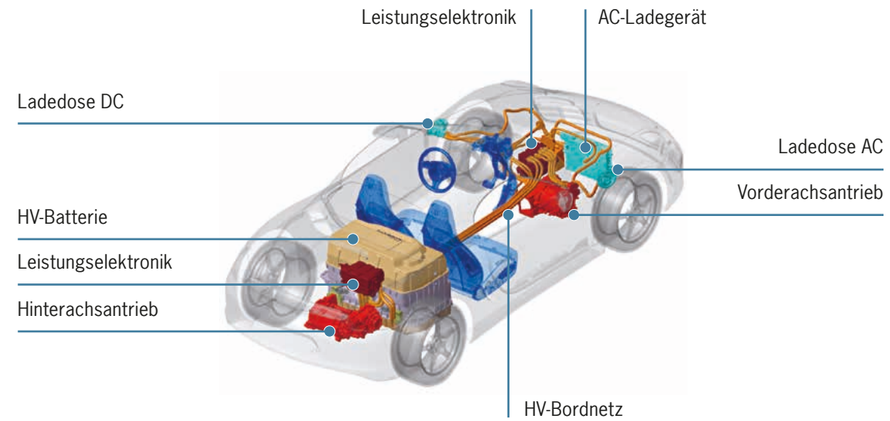
e-generation

Ein Forschungsprojekt mit positiver Bilanz

____Ein Forschungskonsortium entwickelte unter der Leitung von Porsche neue Komponenten für Elektrofahrzeuge und erprobte sie in drei Elektrosportwagen auf Basis des Porsche Boxster. Im Frühjahr 2015 endete das von der Bundesregierung geförderte Projekt *e-generation*, an dem Porsche Engineering maßgeblich beteiligt war. Bezüglich der Reichweite, Kostenreduzierung und Alltagstauglichkeit für Elektrofahrzeuge wurden erhebliche Fortschritte erzielt.

Von Stefan Bender, Dr. Hartmut Chodura, Manuel Groß, Thorsten Kühn und Volker Watteroth

Forschungsfahrzeug aus dem Projekt e-generation



Überblick der Hochvolt-Komponenten im Fahrzeug

Bereits 2010 entstanden unter Leitung von Porsche Engineering drei elektrisch angetriebene Porsche Boxster-Forschungsfahrzeuge. Mit ihnen wurden über 70 000 Kilometer zurückgelegt und mehrere Hundert kundennahe Testfahrten ausgewertet. Das Fahrzeugkonzept war ein Erfolg. Fahrverhalten und Zuverlässigkeit wurden positiv bewertet, Einschränkungen ergaben sich – erwartungsgemäß – hauptsächlich bei Reichweite und Fahrzeuggewicht.

Anschließend startete im April 2012 das dreijährige Projekt *e-generation* mit 13 Partnern aus Forschung und Industrie. Es wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert und endete planmäßig im Frühjahr 2015. Die Hauptziele waren:

> Senkung des elektrischen Energiebedarfs (Schwerpunkt: Antrieb und Klimatisierung),
> Reduktion des Fahrzeuggewichts,
> Kostensenkung der Antriebskomponenten,
> Komfort und Alltagstauglichkeit wie bei einem Serien-Porsche.

Als Versuchsträger dienten drei im Entwicklungszentrum Weissach neu aufgebaute Prototypen. Die Fahrzeuge erhielten Ende 2013 die notwendigen Freigaben und werden seitdem auch im öffentlichen Straßenverkehr erprobt.

Antriebskonzept mit zwei Elektromotoren und Allradantrieb

In der Konzeptphase wurden zahlreiche Antriebsmodelle untersucht und mithilfe von Simulationen bewertet. Oberste Prämisse war dabei, eine Konfiguration zu finden, die den Projektzielen genügt und gleichzeitig Fahreigenschaften ermöglicht, die von Porsche-Sportwagen erwartet werden. Darüber hinaus mussten der vorhandene Bauraum und die Gegebenheiten des Fahrwerks berücksichtigt werden. Unter diesen Voraussetzungen kristallisierte sich ein Antriebskonzept heraus, bei dem je eine quer eingebaute E-Maschine Vorder- und Hinterachse antreibt.

Unter Leitung der Robert Bosch GmbH wurden zwei neue E-Maschinen entwickelt, die sich durch verbesserte Wirkungsgrade auszeichnen. Zum einen legte dafür die Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen eine permanent erregte Synchronmaschine (PSM) aus, zum anderen entstand unter Mitarbeit der TU Braunschweig eine Asynchronmaschine (ASM). Für beide Maschinen übernahm ›

Bundesministerium für Bildung und Forschung

VDI|VDE|IT

Die Förderpartner

Bosch anschließend den Aufbau und die betriebsbereite Fertigstellung.

Die PSM treibt die Vorderachse an, die ASM befindet sich im Heck unter dem hinteren Kofferraum. Die Steuerung der Motoren übernehmen zwei Leistungselektroniken von Bosch. Das Antriebsmanagement basiert auf der Software von Bosch, von Porsche stammen Applikation und Parametrierung. An der Vorderachse stehen bis zu 120 kW zur Verfügung, der Hinterachsmotor leistet maximal 140 kW. Damit kann das Fahrzeug in 5,2 Sekunden von null auf 100 km/h beschleunigt werden. Der Fahrer kann zudem zwischen den Fahrprogrammen Normal, Sport und Range wählen. Im Range-Modus übernimmt hauptsächlich die effizientere PSM an der Vorderachse den Antrieb. Im Sport-Modus werden immer beide Achsen angetrieben, was Porsche-typische Fahreigenschaften ermöglicht.

Energieversorgung durch neu entwickelte Hochvoltbatterie

Die Hochvoltbatterie (HV-Batterie) im 400-Volt-Bereich wurde von Porsche Engineering ausgelegt und entwickelt. Durch konsequenten Leichtbau und moderne Zelltechnologien stehen rund 35 kWh Energie zur Verfügung, 20 Prozent mehr als im Prototyp von 2010. Die abrufbare elektrische Leistung liegt kurzzeitig bei rund 270 kW.

Die Hochvoltbatterie des Forschungsprojekts wurde von Porsche Engineering ausgelegt und entwickelt.

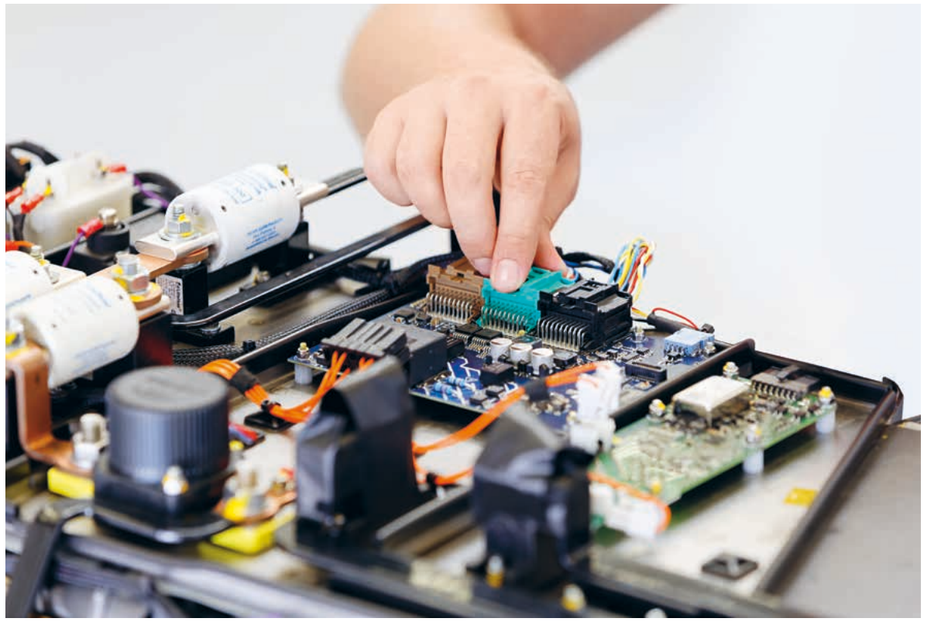
Die Batterie wird flüssiggekühlt und kann über PTC-Folien beheizt werden. Für die Kühlung entstand ein neues Konzept, das auf die bisher üblichen, relativ schweren Metallplatten verzichtet. Stattdessen wurden Kühlelemente entwickelt, die direkt an den Zellpolen angebracht sind. Dadurch konnten das Gewicht gesenkt und der Wärmetransport verbessert werden.

Zum Laden der Batterie verfügen die Prototypen über mehrere Anschlüsse. Das eingebaute Ladegerät liefert abhängig vom Stromanschluss bis zu 22 kW elektrischer Leistung. Damit kann eine leere Batterie in rund anderthalb Stunden geladen werden. An Schnellladestationen erreicht die Batterie in weniger als 20 Minuten 80 Prozent ihrer Kapazität.

Die Batterieentwicklung im Forschungsprojekt ist eine Weiterentwicklung der Komponente des Vorgängerfahrzeugs von 2010. Das Prinzip beruht auf folgendem Aufbau:

> zwei Zellmodulebenen mit jeweils fünf Zellmodulen,
> ringförmiger Tragrahmen als zentrales Strukturelement,
> zwei Gehäusedeckel in faserverstärkter Leichtbauweise,
> batterieinterne Aufteilung der Traktionspfade in jeweils einen Anschluss vorne und hinten.

Der grundlegende Unterschied zum Konzept von 2010 ist die Eigenentwicklung der Zellmodule unter Verwendung von Pouch-Zellen der Firma LG Chemicals. In der Modulentwicklung stecken zahlreiche Innovationen: Die autarken Module mit integrierter Kühlung/Heizung, Batterie-Management-System (BMS) und modularem Aufbau auf minimalem Bauraum ergeben ein kompaktes Package. Die Verbindung von Zell-Terminal- und Flächenkühlung führt zu einer hocheffizienten Modulkühlung



Das Batterie-Management-System (BMS) für Spannungslagen bis 800 Volt kann in verschiedenen Antriebssystemen optimal appliziert werden.

für performanceorientierte Anwendungen. Auch mit dem erstmaligen Einsatz einer PTC-Heizfolie für effiziente Erwärmung direkt an der Zelle betraten die Entwickler Neuland. Das Batterie-Management-System schließlich ist eine komplette Eigenentwicklung von Porsche Engineering für Spannungslagen bis 800 Volt und kann optimal in verschiedene Antriebssysteme appliziert werden.

In den drei Jahren der Projektlaufzeit entwickelten die Ingenieure den kompletten Hochvolt-Energiespeicher und bauten drei Prototypenbatterien auf. Jedes Batteriemodul verfügt über einen bei Porsche Engineering entwickelten Zellcontroller. Er überwacht alle Zellspannungen und Temperaturen des Moduls. Die Daten gehen an das zentrale Steuergerät der Batterie. Dort erfolgen die Auswertung sowie die Überwachung der elektrischen Isolation. Über den CAN-Bus können auch andere Komponenten diese Daten empfangen.

Die Verteilung des Kühlmediums in der Batterie erfolgt durch eine Parallelschaltung der Modulkühler mit je einem Kühlmittelverteiler pro Modulebene. Die Kühlmittelanschlüsse am Modulkühler und die Kühlmittelverteiler bestehen aus Standardbauteilen der Norma Group. Dadurch werden Dichtigkeit und Qualität gewährleistet. Zudem verfügt die Batterie über zwei leckagefreie Schnelltrennkupplungen der Firma Stäubli, die den schnellen und unkomplizierten Ein- und Ausbau der Traktionsbatterie einschließlich Rahmen ermöglichen.

Ein glasfaserverstärkter Deckel schützt die Batterie vor Spritzwasser von oben, eine Gore-Membrane gewährleistet den Druckausgleich. Die lückenlose elektrische Schirmung für gute elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) übernimmt ein Überzug aus metallisiertem Lack auf den beiden Kunststoffdeckeln oben und unten.

Die technischen Daten und besondere Kennzahlen der Batterie sind auf der folgenden Seite zusammengefasst.

Crashsichere Lagerung der Batterie im Hinterwagen

Das Batteriepaket fand crashsicher Platz im Hinterwagen des Boxsters. Für die Sicherheit ist vor allem der ringförmige Tragrahmen aus hochfestem Aluminium verantwortlich. Durch dessen strukturoptimierte Auslegung können alle Eigenlasten sowie die Crashlasten für Beschleunigungen bis zu 60 g abgefangen werden. Der Tragrahmen überträgt praktisch das Heckcrashkonzept vom Serien-Boxster mit Verbrennungsmotor ›

Technische Daten

Zellhersteller	LG Chem
Zelltyp	Pouch P2.6 (PHEV)
Zellchemie	NMC
Kapazität	25,9 Ah
Nennspannung	3,7 V
Verschaltung	100S4P, 10 Zellmodule
Energiegehalt	38,3 kWh nominal, 35,8 kWh nutzbar
Leistung	270 kW (420 V, 650 A)
Spannung	370 V nominal, 410 V maximal
Reichweite	> 200 km
Batteriekühlung	Terminal- und Flächenkühlung mit Wasser/Glykol

Kennzahlen der HV-Batterie

Zellanteil am Gesamtvolumen	31 % (84 l von 271 l)
Modulanteil am Gesamtvolumen	61 % (166 l von 271 l)
Zellanteil an der Gesamtmasse	64 % (230 kg von 362 kg)
Modulanteil an der Gesamtmasse	81 % (295 kg von 362 kg)
Strukturanteil an der Gesamtmasse	15 % (54 kg von 362 kg)
Leistungsdichte pro Kilogramm	754 W/kg
Energiemenge pro Kilogramm	106 Wh/kg

auf das Elektrofahrzeug. Die beiden Zellmodulebenen sind fest am Tragrahmen angebunden, die obere direkt, die untere indirekt über einen glasfaserverstärkten Kunststoffdeckel.

Um die rund 360 Kilogramm schwere Batterie im Fahrzeug unterzubringen, bedurfte es einiger Änderungen im Karosserierohbau. Diese betreffen zum einen den Hinterwagen, an dem die Batterie befestigt wird, und zum anderen den Vorderwagen, um Raum für den Vorderachsantrieb zu schaffen. Auf Produktionsstraßen, die für die Serienfertigung ausgelegt sind, wurden Sonderteile verbaut, wie etwa ein von Porsche Engineering entwickelter Hybrid-Querträger aus faserverstärktem Kunststoff (siehe Porsche Engineering Magazin 1/2015).

Thermomanagement reduziert Stromverbrauch

Batterien funktionieren am besten bei klimatischen Bedingungen, unter denen sich auch der Mensch wohlfühlt. Bei zu niedrigen oder zu hohen Temperaturen leidet die Lebensdauer der Energiespeicher, zusätzlich sinkt bei tiefen Temperaturen die zur Verfügung stehende Leistung. Deshalb muss die Batterie gegebenenfalls gekühlt oder beheizt werden. Die dafür notwendige Energie kommt aus der Batterie selbst, was jedoch die Reichweite reduziert.

Bei niedrigen Außentemperaturen wird die Batterie während des Ladens mit einem Teil des zugeführten Stroms beheizt. Das spart Energie aus der Batterie und sorgt dafür, dass dem Antrieb bereits zu Fahrtbeginn die maximale Leistung zur Verfügung steht. Da der Wirkungsgrad der Batterie bei rund 95 Prozent liegt, bleibt die Selbsterwärmung bei hohen Leistungsabforderungen mit unter fünf Kilowatt relativ gering. Erst bei Außentemperaturen von über 30 Grad wird ein Klimakreislauf benötigt, der die Batterie über einen Kälteprozess unter die Umgebungstemperatur abkühlen kann.

Da Elektromotoren und HV-Batterien einen hohen Wirkungsgrad haben, erzeugen sie im Vergleich zu einem Verbrennungsfahrzeug relativ wenig Abwärme. Möchte man den Fahrgastraum des Fahrzeuges aber heizen, muss die Energie aus der HV-Batterie verwendet werden. Dies reduziert natürlich die Reichweite des Fahrzeugs.

Unter Leitung der Firma Mahle Behr wurde im Projekt *e-generation* eine thermoelektrische Wärmepumpe entwickelt, mit der man schon geringe Abwärme auf ein Temperaturniveau heben kann, das zum Heizen des Innenraums geeignet ist. Die besten Wirkungsgrade hat diese Wärmepumpe bei Umgebungstemperaturen zwischen zehn und 15 Grad, also wie sie in Mitteleuropa üblich sind. Hier liegt die sogenannte Leistungszahl (Coefficient of Performance) bei zwei. Das bedeutet, dass der Energiebedarf aus der Hochvoltbatterie auf 50 Prozent gesenkt werden kann.

Erprobung bestätigt Alltagstauglichkeit

In der ersten Erprobungsphase absolvierte der Prototyp einige Tausend Testkilometer bei ständigen Verbesserungen und Optimierungen. Für die Straßenfreigabe wurde das Fahrzeug dabei auf dem Testgelände in Weissach auf Funktion und Standfestigkeit geprüft. Die Optimierung von Antrieb und Fahrwerk fand vorwiegend im Porsche-Testzentrum in Nardò (Süditalien) statt. In den winterlichen Alpen überzeugten die Prototypen ebenfalls: Der vollelektrische Boxster ist auch nach einer Nacht mit minus 25 Grad Außentemperatur fahrbereit.

Zur Optimierung der Alltagstauglichkeit entstanden im Laufe des Projektes verschiedene Assistenzsysteme. In Zusammenarbeit mit dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) wurde eine Längsführung umgesetzt, die aus prädiktiven Streckendaten eine möglichst effiziente Geschwindigkeitsplanung für den vorausliegenden Weg berechnet. Das System lässt das Fahrzeug nicht nur souverän im Verkehr mitschwimmen, sondern ermöglicht es auch, auf freier Landstraße sicher und dynamisch durch die Kurven zu fahren. Gemeinsam mit der RWTH und dem KIT wurde zudem ein Ausrollassistent entwickelt, der dem Fahrer vor Kurven oder Geschwindigkeitswechseln zum optimalen Zeitpunkt einen Hinweis gibt, den Fuß vom Fahrpedal zu nehmen.

Ausblick

Auf *e-generation* folgt *e-volution*: Gemeinsam mit Partnern aus Industrie und Forschung treibt Porsche die Entwicklung des Elektrofahrzeugs im dritten Projekt in Folge weiter voran. *e-volution* zielt auf die weitere Steigerung von Reichweite, Alltagstauglichkeit und Performance ab. ■

Zwei Porsche Boxster aus dem Forschungsprojekt e-generation *bei einer winterlichen Erprobungsfahrt in den Alpen.*

Elektrisch. Effizient. Emotional.

____Dirk Lappe, Technischer Geschäftsführer von Porsche Engineering, über zukünftige Mobilitätskonzepte, Digitalisierung und elektrischen Fahrspaß.

Interview: Frederic Damköhler; Fotos: Jörg Eberl

Herr Lappe, wie wird Ihrer Meinung nach das Auto der Zukunft aussehen?

Dirk Lappe Beim Auto der Zukunft denken viele Menschen heute sofort an autonomes Fahren. Daher möchte ich zuallererst feststellen, dass das Auto der Zukunft immer sehr stark vom Thema Umwelt und CO_2-Reduktion geprägt sein wird, große Investitionen erfordert und uns Entwicklern gewaltige Anstrengungen abverlangt. Zukünftige Fahrzeuge werden einen vor wenigen Jahren noch unvorstellbar niedrigen Energieverbrauch haben und smarte Konzepte beinhalten, die in geeigneter Weise erneuerbare Energien für die individuelle Mobilität einsetzen. Wichtig ist auch, dass Mobilität nicht losgelöst vom generellen Thema Umwelt und Energie gesehen werden kann, sondern sich nahtlos in eine weltweite Gesamtstrategie zur Dekarbonisierung einfügt. Autonomes Fahren ist mit dieser Sichtweise für mich eher eine Anwendung im Rahmen smarter Mobilitätskonzepte, die zur CO_2-Reduktion beiträgt, jedoch kein Selbstzweck.

Welche Umwelt- und Energiethemen haben den größten Einfluss auf das Auto der Zukunft?

Lappe Bis zum Jahr 2020 soll die Emission von Treibhausgasen in Deutschland gegenüber 1990 um 40 Prozent sinken, der Ausstieg aus der Kernenergie als Brückentechnologie ist bis 2022 geplant. Und bis 2050 soll der Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch mindestens 80 Prozent betragen. Im Vergleich zu 2008 ist beim Primärenergieverbrauch eine Reduzierung um 50 Prozent und beim Stromverbrauch eine Reduzierung um 25 Prozent vorgesehen. Der Energieverbrauch für Verkehr soll bis 2050 um 40 Prozent gegenüber 2005 reduziert werden. Die EU hat sich unter anderem auch dem Thema Abgas angenommen, demnach darf die gesamte EU-Neufahrzeugflotte eines Herstellers – gemessen an den Vorgaben des europäischen Verbrauchszyklus NEFZ – ab dem Jahr 2020 nur noch 95 Gramm CO_2 pro Kilometer ausstoßen.

Wie kommen wir dahin?

Lappe Um das alles zu erreichen ist es notwendig, die Effizienzpotenziale der Industrie auszuschöpfen und das Stromnetz ebenso effizient wie umweltverträglich auszubauen. Auch die Digitalisierung ist kein Selbstzweck, sondern sollte vornehmlich darauf ausgerichtet sein, Verkehrs- und Energieflüsse auf smarte Weise zu lenken. Kurz, es erfordert von vielen Akteuren große Anstrengungen mit hohen Investitionen. Es reicht nicht, dass wir Elektrofahrzeuge entwickeln, die allgemeinen Rahmenbedingungen müssen stimmen, damit diese Autos auch gekauft werden. Die aus dem Silicon Valley angekündigten neuen Mobilitätsdienste, welche sich durch autonom fahrende Fahrzeuge ergeben sollen, oder sich möglicherweise ändernde Geschäftsmodelle durch neue Player als Konkurrenz zur klassischen Automobilindustrie sind für die Lösung des CO_2-Problems erst mal zweitrangig oder sogar kontraproduktiv.

Glauben Sie an den Erfolg des Elektrofahrzeugs?

Lappe Natürlich! Elektroantriebe bieten zuallererst einmal die Möglichkeit für eine CO_2-neutrale und vollständig emissionsfreie Mobilität. Eine weitere gute Nachricht: E-Maschinen bringen zusätzlich eine Menge Fahrspaß. CO_2-Neutralität und Spaß am Fahren schließen sich überhaupt nicht aus. Ein Elektrofahrzeug ist ein sehr emotionales Produkt, aufgrund der Charakteristik der E-Maschine entsteht schon beim Anfahren ein sehr hohes Drehmoment, welches sich in einer extrem dynamischen Anfahrtsbeschleunigung widerspiegelt. Elektrofahrzeuge zeichnen sich zudem durch einen hohen Wirkungsgrad und eine äußerst hohe Wartungsfreundlichkeit aus. ›

Dirk Lappe, seit 2009 Technischer Geschäftsführer von Porsche Engineering

Ein E-Antrieb erfordert einen geringen Bauraum und führt zu neuen, attraktiven Innenraumkonzepten.

Wo sehen Sie die größten Hürden für das Elektrofahrzeug?

Lappe Die größte Herausforderung ist nach wie vor die Speicherung der elektrischen Energie im Fahrzeug. Das Batteriesystem im Elektrofahrzeug ist schwer und teuer und hinsichtlich der in einem konventionellen Fahrzeug verfügbaren transportierten Energiemenge noch weit unterlegen. Bei kleinen Elektrofahrzeugen macht die Batterie mehr als die Hälfte des Verkaufspreises aus. Mit größer werdenden Batteriesystemen entsteht ein neues Problem: das Thema Ladezeiten. Bei einer Batteriegröße von 80 Kilowattstunden und einer typischen Ladeleistung von 30 Kilowatt steht man zum Laden zweieinhalb Stunden an der Strom-Tankstelle. Es wird ja den Fall geben, dass man das Auto nicht zu Hause über Nacht geladen hat und ungeplant eine weite Strecke fahren möchte. Zudem ist der Gedanke, dass der „Tank“ ständig leer ist, ohne schnell geeignet nachladen zu können, für den Verbraucher schwer zu ertragen. Eine Lösung des Problems ist die Erhöhung der Ladeleistung auf 300 Kilowatt. Dies reduziert die Ladezeit auf gut zehn Minuten. Um diese hohen Ladeleistungen darzustellen, müssen wir neue Wege gehen, zum Beispiel die Ladespannung von 400 Volt auf 800 Volt erhöhen.

„Wir entwickeln eine nachhaltige, erstrebenswerte Zukunft, auf die ich mich freue.“

Wie wird das Problem der Energiespeicherung zukünftig gelöst?

Lappe Die Speicherfähigkeit von Lithium-Ionen-Batterien beträgt derzeit rund 100 Wattstunden pro Kilogramm. Beim Forschungsfahrzeug Boxster E mit einem Verbrauch von circa 140 Wattstunden pro Kilometer reicht dies zwar im Idealfall für eine Reichweite von 270 Kilometern aus, trägt jedoch durch das hohe Batteriegewicht von etwa 360 Kilogramm zu einem im Vergleich mit dem Benzinmodell deutlich höheren Gesamtgewicht bei. Die Grenze von Lithium-Ionen-Zellen wird heute etwa bei 200 bis 250 Wattstunden pro Kilogramm gesehen, die aktuell möglichen Reichweiten werden sich innerhalb dieser Grenze in den nächsten fünf Jahren verdoppeln. Allgemein wird vermutet, dass es zwischen 2020 und 2030 einen Technologiesprung auf mehr als 500 Wattstunden pro Kilogramm, zum Beispiel in Richtung Lithium-Sulphur, geben wird. Diese Technologie kann die Elektrofahrzeuge in puncto Reichweite und Gewicht revolutionieren. Für Lithium-Sauerstoff-Batterien sind sogar 400 bis 2200 Wattstunden pro Kilogramm angekündigt, ich glaube jedoch nicht, dass diese Technik in einem überschaubaren Zeitraum zum Einsatz kommt.

Ist die Brennstoffzelle noch eine Alternative?

Lappe In der Tat ist das Thema „Wasserstoffwende“ wieder in der Presse zu finden. Während die Technologie bereits ausgereift genug ist für die Markteinführung, sind deren Kosten immer noch zu hoch. Durch den hohen Platinanteil der Katalysatoren und die teuren Isolationsmaterialien des Wasserstofftanks werden die Materialkosten noch lange Zeit deutlich höher sein als bei Batterien. Obwohl viele Bauteile konstruktionstechnisch gesehen eigentlich serienreif wären, fehlt es zudem an Lieferanten, die hohe Stückzahlen herstellen können. Außerdem gibt es bisher und aller Voraussicht nach auch in naher Zukunft kein etabliertes Tankstellennetz. Ich denke daher, ein vernünftiges Batterie- oder Plug-in-Hybrid-Konzept wird von der Anwendung und vom Preis-/Leistungsverhältnis bei ähnlicher Nachhaltigkeit – durch Einsatz von flüssigem oder gasförmigem Kraftstoff aus erneuerbaren Energien – einem Brennstoffzellenkonzept auf lange Zeit weit überlegen sein.

Wie werden wir die Autos innen erleben?

Lappe Im Auto der Zukunft wird das Interieur anders aussehen. Der Innenraum wird so gestaltet sein, dass man wahlweise autonom oder nicht autonom fahren kann. Das Bedienkonzept wird sich radikal ändern. Selbst Lenkräder werden anders aussehen als heute und noch weitere Funktionen erfüllen. Neuartige Nutzerinterfaces stehen vor der Tür. Darauf sind wir vorbereitet und bauen unsere Softwarekompetenz massiv aus.

Welche Rolle spielt Porsche Engineering bei all diesen Entwicklungen?

Lappe Porsche Engineering hat den Anspruch, die Welt von morgen aktiv mitzugestalten – insbesondere natürlich in Mobilitätsfragen. Fahrzeuge als Ganzes oder einzelne Komponenten und Module werden entsprechend den Anforderungen der Zukunft laufend optimiert. Dabei stehen neben Innovation und Effizienz auch Ökologie und Nachhaltigkeit im Fokus der Entwicklung. Als integraler Bestandteil der Porsche-Entwicklung sind wir in allen Bereichen zukünftiger Fahrzeugentwicklung tätig, auch auf dem Gebiet der Elektroantriebe und Smart Mobility. Porsche Engineering ist für viele Kunden der strategische Partner bei der Auslegung kompletter elektrischer Antriebe, in der wir alle Kompetenzen vorweisen können, von der Idee auf einem weißen Blatt Papier bis zum Test des finalen Produktes im Nardò Technical Center.

Wie wird die Gesamtmobilität in Zukunft aussehen?

Lappe Es werden sich bis zum Jahr 2030 massive Veränderungen und Herausforderungen in der Mobilität ergeben. Weltweit leben immer mehr Menschen in Großstädten. Besonders in weniger entwickelten Ländern sind dort die Lebensbedingungen für viele attraktiver. Aktuell streben in China 100 Millionen Wanderarbeiter vom Land zusätzlich in die Städte. 2008 lebten global gesehen erstmals mehr Menschen in Städten als auf dem Land, mittlerweile wohnen neun Prozent der städtischen Weltbevölkerung in Megacitys. Der Umstand, dass eine solch hohe Anzahl von Menschen auf engstem Raum lebt, führt zwangsläufig zu neuen urbanen Problemen und Herausforderungen. Darauf müssen sich die Fahrzeughersteller einrichten, was bereits in vielerlei Hinsicht geschieht.

Die relativ kurzen Distanzen innerhalb der Megacitys werden in absehbarer Zeit nur mehr elektrisch gefahren werden. Plug-in-Hybride und Elektrofahrzeuge werden also das Stadtbild prägen. Im Bereich der Zweiräder hat die Elektromobilität in China schon lange einen Siegeszug angetreten. Bereits existierende Straßen für Autos lassen sich um zusätzliche Fahrspuren für motorradartige Fahrzeuge erweitern. Diese einspurigen Fahrzeuge können zum Beispiel im Stand von einem Kreiselantrieb stabilisiert werden, der seine Energie im Fahrbetrieb zurückführt.

Wie stark werden diese Fahrzeuge vernetzt sein?

Lappe Meine These ist, dass der Autofahrer des Jahres 2030 nicht mehr im Stau steht, da intelligente Verkehrsleitsysteme die Verkehrsströme so lenken, dass Staus gar nicht erst entstehen. Sollte es ausnahmsweise doch einen Stau geben, stört dies den Fahrer zukünftig nicht, weil er innerhalb der Fahrzeugumgebung wie im heimischen Wohnzimmer oder am Arbeitsplatz gewohnten Tätigkeiten nachgehen kann. Eine Zukunftsvision wäre also eine Großstadt im Jahr 2030, in der komplett vernetzte Fahrzeuge aller Klassen auf mehreren Ebenen gesteuert werden. Nahverkehr und Fernverkehr sind in einem intermodalen Konzept perfekt integriert. Das Bedürfnis des Menschen nach individueller Mobilität besteht dabei jedoch weiter, in vielen Fällen bleibt das eigene individuelle Fahrzeug ein Stück Lebenskultur.

Die mobile Selbstbestimmung endet also nicht mit dem autonomen Fahrzeug?

Lappe Der Wunsch nach Mobilität ist so alt wie die Menschheit. Es wird auch in 30 Jahren noch Menschen geben, die ihre Umgebung erkunden oder mit der Familie aufs Land fahren wollen. Wir von Porsche Engineering wollen unseren Beitrag dazu leisten, die Zukunft besser und nachhaltiger zu gestalten. Jeder Mensch wird dabei deutlich effizienter unterwegs sein als heute. Das bezieht sich sowohl auf Verbrauch und Emissionen der Fahrzeuge, aber auch auf angenehmeres Reisen durch die Vernetzung der Fahrzeuge. Hierbei wird es weiterhin Bereiche geben, in denen autonomes Fahren wenig Sinn macht oder der Mensch eine „Fremdbestimmung“ nicht haben möchte.

Ferry Porsche hat einmal gesagt, dass das letzte gebaute Auto ein Sportwagen sein wird. Im übertragenen Sinne heißt das für mich, dass auch bei zukünftigen Fahrzeugen der Fahrspaß und die Freude an der eigenen, individuellen Mobilität im Mittelpunkt stehen. Wir geben uns also nicht damit zufrieden, nur das Hier und Jetzt weiterzuentwickeln. Wir entwickeln gemeinsam mit unseren Kunden eine nachhaltige, erstrebenswerte Zukunft, auf die ich mich freue – und in der ich auch weiterhin das Lenkrad selbst in die Hand nehmen kann, wenn ich es möchte. ■

Dirk Lappe

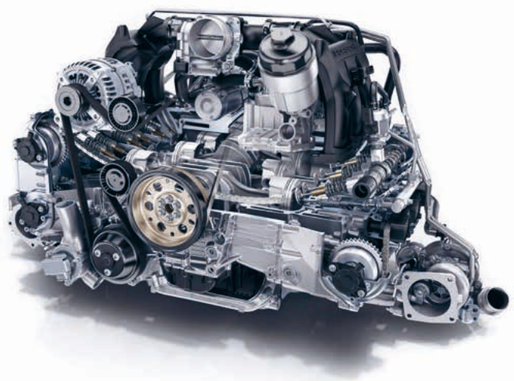
Dirk Lappe (52) studierte an der TU Braunschweig Elektrotechnik, Fachrichtung Nachrichtentechnik. Nach seinem Studium arbeitete er von 1989 bis 1996 in der zentralen Forschung der Robert Bosch GmbH in Hildesheim an verschiedenen Projekten im Bereich Bildverarbeitung und Nachrichtenübertragung und konnte hierbei die Standards MPEG-4 und UMTS mitentwickeln. Als Leiter der europäischen Projekte Mobile Audio Visual Terminal (MAVT) und Mobile Multimedia Systems (MoMuSys) vertrat er von 1992 bis 1996 die europäische Plattform für MPEG-4 und die Multimediadienste von UMTS in der Mobile Project Line Assembly (MPLA) in Brüssel. Von 1996 bis 1998 leitete Dirk Lappe die UMTS-Entwicklung bei der Bosch Telecom GmbH. In der Funktion des General Manager Strategic Programs baute er ab 1998 bei Harman Becker in Karlsbad die Telematik-Entwicklung auf. 2002 kam Dirk Lappe zu Porsche Engineering und übernahm zunächst die Leitung des Fachbereichs Elektrik/Elektronik. Seit 2009 ist er Technischer Geschäftsführer des Unternehmens. Dirk Lappe hält mehr als 70 Erfindungsmeldungen und Patente.

911 CARRERA-MODELLE (TYP 991 II)
Kraftstoffverbrauch (kombiniert):
9,0 – 7,4 l/100 km;
CO_2-Emission (kombiniert):
208 – 169 g/km;
Effizienzklassen: F – D

Der neue Porsche 911 Carrera

Mehr Effizienz und Performance

Kein anderes Modell verkörpert die Marke Porsche so wie der 911. Seit über fünf Jahrzehnten bringt er Design, Performance, Alltagstauglichkeit und Effizienz auf einzigartige Weise in Einklang – so auch die neue Generation dieser Baureihe. Mit innovativen Turbo-Boxermotoren, weiterentwickeltem Fahrwerk mit noch mehr Spreizung zwischen Performance und Komfort sowie neuem Infotainment-System ist er dafür bestens gerüstet. Die erstmals für die Carrera-Modelle optional angebotene Hinterachslenkung erweitert auf Wunsch das fahrdynamische Spektrum nochmals nachdrücklich. Auch äußerlich präsentiert sich der 911 Carrera mit vielen optischen Verfeinerungen: Diese reichen von neuen Scheinwerfern mit Vierpunkt-Tagfahrlicht über schalenlose Türgriffe bis hin zu einem neu gestalteten Heckdeckel mit vertikalen Lamellen und neuen Heckleuchten – unter anderem mit den charakteristischen Vierpunkt-Bremsleuchten. Im Innenraum bietet das neue, serienmäßige Porsche Communication Management (PCM) mit Multitouch-Bildschirm ein deutlich erweitertes Funktionsspektrum und eine erheblich vereinfachte Bedienung.



Das Triebwerk im 911 Carrera S: 3,0-Liter-Sechszylinder-Biturbo-Boxermotor mit 309 kW (420 PS)

Leistung, Drehmoment und Effizienz gesteigert: die neuen Biturbo-Boxermotoren

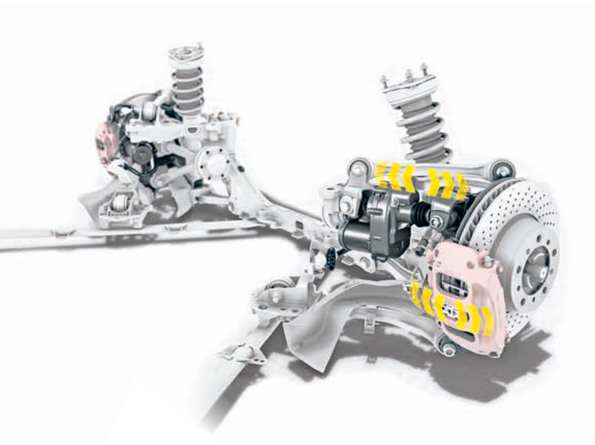
Dank mehr als vier Jahrzehnten Erfahrung mit Turbomotoren – sowohl im Rennsport als auch in Seriensportwagen – erreichen die neu entwickelten Aggregate des neuen 911 Carrera Bestwerte in Bezug auf Performance, Fahrspaß und Effizienz. Die komplett neue Motorengeneration mit Biturbo-Aufladung und zentraler Lage des Injektors im Brennraum steigert den Fahrspaß zu einem noch intensiveren Erlebnis: souveräne Kraft schon aus dem Drehzahlkeller, spontane Leistungsentfaltung bis in höchste Drehzahlbereiche und dennoch deutlich weniger Verbrauch. 272 kW (370 PS) warten im Heck des neuen 911 Carrera darauf, in sportlichen Vortrieb umgesetzt zu werden, 309 kW (420 PS) leistet das Triebwerk des 911 Carrera S. In beiden Fällen ein Plus von 15 kW (20 PS) im Vergleich zu den Vorgängermodellen. Noch deutlicher fällt der Gewinn an Drehmoment aus: Mit 450 Nm beim 911 Carrera und 500 Nm beim 911 Carrera S legen beide Antriebe um jeweils 60 Nm zu. Der Fahrer profitiert indes nicht nur durch gesteigerte Maximalwerte; er kann das volle Drehmoment bereits ab 1700/min in Spurtstärke umsetzen. Im gesamten Bereich bis 5000/min steht das volle Drehmoment zur Verfügung. Gleichzeitig arbeitet die neue Motorengeneration deutlich sparsamer, der Verbrauch sinkt je nach Version um bis zu einem Liter pro 100 Kilometer. Der 911 Carrera mit dem Porsche-Doppelkupplungsgetriebe (PDK) begnügt sich laut Neuem Europäischem Fahrzyklus (NEFZ) jetzt mit nur noch 7,4 Liter Kraftstoff auf 100 Kilometer (minus 0,8 l/100 km), der 911 Carrera S mit PDK liegt bei 7,7 l/100 km (minus 1,0 l/100 km).

Es gibt viele Gelegenheiten, bei denen der neue Elfer die Vorzüge seines Turbomotors demonstrieren kann.

Von null auf 100 in 3,9 Sekunden

Auch die Fahrleistungen des neuen 911 überzeugen: Das 911 Carrera Coupé mit PDK und dem optionalen Sport Chrono Paket sprintet von null auf 100 km/h in 4,2 Sekunden und ist damit zwei Zehntelsekunden schneller als sein Vorgänger. Der 911 Carrera S mit PDK und Sport Chrono Paket absolviert die Paradedisziplin in nur 3,9 Sekunden (ebenfalls minus 0,2 s). Damit unterbietet er als erster 911 der Carrera-Familie die magische Vier-Sekunden-Marke. Und auch die Höchstgeschwindigkeiten für beide Modelle sind weiter gewachsen: Das Spitzentempo des 911 Carrera liegt nun bei 295 km/h (plus 6 km/h), der 911 Carrera S erreicht jetzt sogar 308 km/h (plus 4 km/h).

In Verbindung mit dem Sport Chrono Paket verfügt der 911 Carrera des Weiteren erstmals über einen Mode-Schalter im Lenkrad, der vom Hybrid-Modus-Schalter des 918 Spyder abgeleitet ist. Der Mode-Schalter besteht aus einem drehbaren Ring mit vier Positionen für die Fahrprogramme „Normal“, „Sport“, „Sport Plus“ und „Individual“. Die letztgenannte Einstellung ermöglicht dem Fahrer, je nach Ausstattung sein ganz individuelles Fahrzeug-Setup zu konfigurieren, beispielsweise das Porsche Active Suspension Management (PASM), die aktiven Motorlager, die PDK-Schaltstrategie und Sportabgasanlage. In Kombination mit dem PDK-Getriebe enthält der Mode-Schalter einen zusätzlichen Druckknopf, den sogenannten „Sport Response Button“. Bei dessen Betätigung wird der Antriebsstrang für 20 Sekunden für bestmögliche Beschleunigung, z. B. für anstehende Überholvorgänge, vorkonditioniert. Dazu wird der optimale Gang eingelegt sowie die Motorsteuerung kurzzeitig für noch spontaneres Ansprechen angepasst. ›



Die optionale aktive Hinterachslenkung des 911 Carrera S

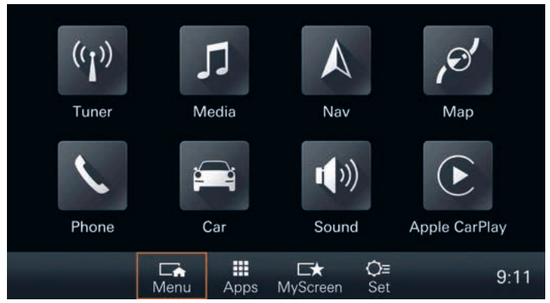
Neu abgestimmtes PASM-Fahrwerk

Der 911 Carrera ist die Referenz für die Fahrdynamik von Allround-Sportwagen. Generation für Generation baut Porsche die Spreizung zwischen Alltagskomfort und Rundstrecken-Performance weiter aus. Das neu abgestimmte PASM-Fahrwerk mit zehn Millimeter Tieferlegung ist erstmals bei allen Carrera-Modellen serienmäßig mit an Bord. Die Stabilität während schneller Kurvenfahrten nimmt dadurch weiter zu. Gleichzeitig steigert die neue Dämpfergeneration mit ihren weiter gespreizten Kennlinien einerseits den Komfort durch ihr noch feineres Ansprechverhalten und andererseits die Aufbauanbindung bei dynamischer Fahrweise. Neue Serienräder mit fünf schlanken Doppelspeichen tragen Reifen mit reduziertem Rollwiderstand und gesteigerter Performance. Bei allen Varianten wächst zudem die Breite der hinteren Felgen um 0,5 auf 11,5 Zoll, und die Hinterreifen des 911 Carrera S messen nun 305 statt 295 Millimeter.

Mit der für den 911 Carrera S optionalen aktiven Hinterachslenkung kommt die Fahrwerkstechnologie aus dem 911 Turbo und 911 GT3 zum Einsatz. Beim Einlenken gewinnt der Elfer dadurch nochmals deutlich an Agilität. Er zeichnet sich bei Spurwechseln im Hochgeschwindigkeitsbereich zudem durch hohe Fahrstabilität aus. Gleichzeitig überzeugt er im Stadtverkehr mit mehr Handlichkeit durch den um einen halben Meter verringerten Wendekreis. Das verbesserte Handling teilt sich dem Fahrer über die neue Lenkradgeneration mit, deren Design sich am Lenkrad des 918 Spyder anlehnt. Das Basis-Volant hat 375 Millimeter Durchmesser, das optionale GT-Sportlenkrad misst 360 Millimeter. Und für uneingeschränkte Alltagstauglichkeit bietet Porsche ein hydraulisches Liftsystem mit integrierten Hubzylindern in den Federbeinen der Vorderachse an. Auf Knopfdruck steigt damit innerhalb von fünf Sekunden die Bodenfreiheit unter der Buglippe um 40 Millimeter und verhindert damit das Aufsetzen des Fahrzeugs etwa bei steilen Garagenausfahrten.

Komfortableres PCM-System

Serienmäßig enthalten die neuen 911-Carrera-Modelle auch das neu entwickelte PCM-System (Porsche Communication Management) inklusive Online-Navigationsmodul und Sprachbedienung. Das PCM lässt sich analog zu einem Smartphone mit Multitouch-Gesten auf dem Sieben-Zoll-Bildschirm bedienen. So ist zum Beispiel auch die Eingabe per Handschrift möglich. Mobiltelefone und Smartphones lassen sich nun auch per WLAN verbinden. Die erstmals in der Mittelarmlehne integrierte Smartphone-Ablagefläche sorgt zudem für akkuschonendes Laden und optimierten



Das Porsche Communication Management 4.0

Mobilfunk-Empfang. Neu ist auch die Möglichkeit der Verbindung des iPhones mit dem PCM zur Nutzung von Apple CarPlay.

Für eine deutlich verbesserte Navigation stehen Echtzeit-Verkehrsinformationen zur Verfügung, die dem Fahrer einen schnellen Überblick über die Verkehrslage und eine dynamische Anpassung der Route garantieren. Zur besseren Orientierung sind zudem erstmals die Dienste Google Earth und Google Street View integriert. Weitere Bestandteile des PCM sind Porsche Car Connect sowie die Porsche Connect App, unter anderem zur Fernsteuerung von Fahrzeugfunktionen, zur Übertragung von Zielen an das PCM für eine Navigation sowie zur Nutzung von Musikstreamingdiensten von Drittanbietern über das PCM.

Neue und verbesserte Assistenzsysteme

Mit weiteren neuen und verbesserten Assistenzsystemen kann der 911 Carrera noch individueller auf die persönlichen Vorstellungen zugeschnitten werden: Der optional erhältliche Tempostat kann jetzt auch moderat bremsen, wenn die vorgegebene Geschwindigkeit beispielsweise auf einem Gefälle überschritten wurde. Der ebenfalls optionale Abstandsregeltempostat ACC (Adaptive Cruise Control) verfügt in Verbindung mit dem PDK-Getriebe jetzt über eine Segelfunktion, dabei öffnen im Kolonnenverkehr die Kupplungen, was durch das antriebslose Rollen Kraftstoff spart. Der optionale Spurwechselassistent überwacht per Radar den rückwärtigen Verkehr und warnt über LED-Leuchten jeweils rechts und links im Spiegeldreieck vor herannahenden Fahrzeugen im toten Winkel. Zusätzlich steigert Porsche die aktive Sicherheit des Sportwagens mit der serienmäßigen Multikollisionsbremse.

Der 911 Carrera ist seit Jahrzehnten der meistverkaufte Sportwagen der Welt. Die neue Generation tritt nun an, diesen Vorsprung weiter auszubauen. Mit innovativen Turbo-Boxermotoren, weiterentwickeltem Fahrwerk mit noch mehr Spreizung zwischen Performance und Komfort sowie neuem Infotainment-System ist er dafür bestens gerüstet. ■

Dynamische Bordnetzsimulation

____ Die Elektrifizierung im Fahrzeug nimmt stetig zu: Neue Fahrdynamik- und Assistenzsysteme arbeiten mit Aktuatoren, die ihre Energie aus dem Bordnetz beziehen. Solche Hochstromverbraucher können mit ihren Spitzenströmen jedoch enorme und in diesem Ausmaß vollkommen neue Anforderungen an das Bordnetz stellen. Die Konsequenz: Ohne dynamische Bordnetzsimulationen ist eine Absicherung des Fahrzeuges nicht mehr möglich.

Von Niklas Guder

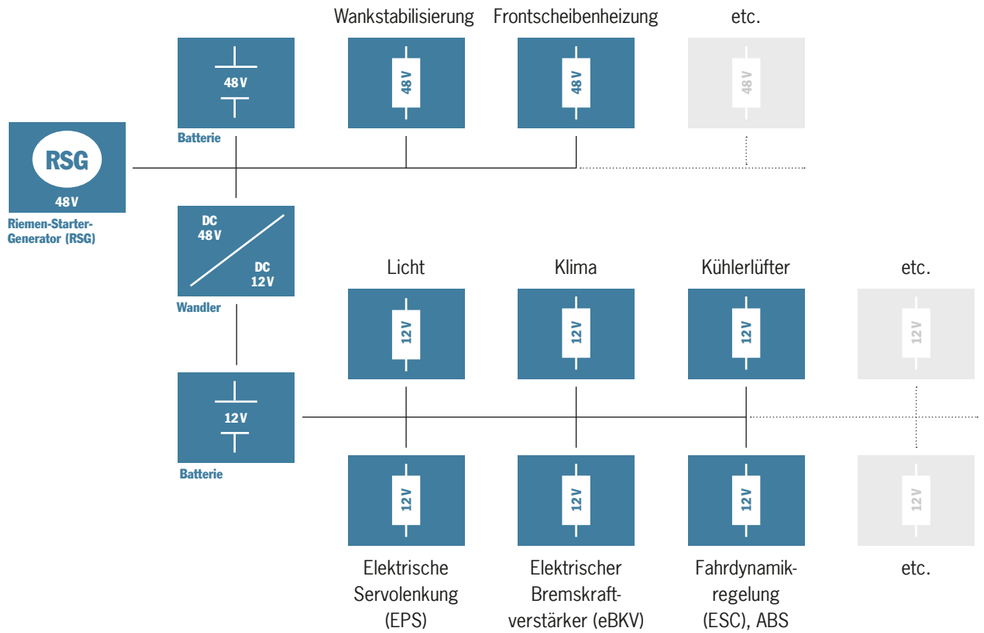


Abbildung 1: Bordnetz mit zwei verschiedenen Spannungsniveaus

Das Niedervolt-Bordnetz – zentrales Nervensystem des Fahrzeugs

Die Entwicklung der vergangenen Jahre zeigt eindeutig, dass dem Niedervolt-Bordnetz (12-Volt-Bordnetz) eine stetig größere Bedeutung zukommt. Mit zunehmender Elektrifizierung steigt der Energie- und Leistungsbedarf permanent an. Die Zeiten, in denen der Generator nur wenige Komponenten wie zum Beispiel den Hauptenergieabnehmer „Licht“ (daher der Name „Lichtmaschine“) versorgen musste, sind schon lange vorbei. Es kommen immer mehr Fahrerassistenzsysteme und Fahrwerkssysteme ins Fahrzeug, welche Komfort, Fahrdynamik und Sicherheit steigern. Dazu zählen beispielsweise Funktionen wie das Stabilitätsprogramm, die automatische Wankstabilisierung oder die elektrische Vorder- und Hinterachslenkung.

Einige dieser Funktionen, genauer ihre Komponenten, benötigen einen enorm hohen Strom in kurzer Zeit, da sie sehr schnell reagieren müssen. Diese Komponenten werden auch Hochstromverbraucher genannt. Der Strom dieser interagierenden Fahrwerkskomponenten kann sich schnell zu Spitzenbelastungen von über 200 A überlagern.

Idealerweise stellt der Generator mehr Leistung bereit als zur Deckung der Grundlast wie Klimatisierung, Heckscheibenheizung oder Licht notwendig ist. Mit diesem Leistungsüberschuss wird die Batterie geladen. Damit ist sichergestellt, dass nach der Fahrt die Batterie genügend Leistung für den nächsten Startvorgang zur Verfügung stellen kann. Man spricht hier von einer positiven Energiebilanz.

Steigt nun der Strombedarf im Bordnetz schneller an als der Generator nachregeln kann (die Regelgeschwindigkeit von Generatoren liegt bei wenigen Hundert Amperesekunden, im Gegensatz dazu fordern die Fahrwerkskomponenten den Strom mit mehreren Tausend Amperesekunden), kommt es zum Leistungsmangel und die Spannung im Bordnetz sinkt. Die Batterie liefert nun die notwendige Differenzleistung, vorausgesetzt, sie ist dazu in der Lage. Bei verschiedenen Randbedingungen, wie beispielsweise tiefen Temperaturen, kann es passieren, dass sie den dynamischen Anforderungen nicht mehr genügt. Ihr Vermögen, Strom zu liefern, wird schlechter, der Innenwiderstand steigt an und damit auch die internen Verluste. Die Bordnetzspannung sinkt folglich unter die erlaubten Grenzwerte. Je nach Spannungswert reagiert die Fahrzeugsteuerung mit verschiedenen Aktionen, wobei diese Grenzen je nach Fahrzeugklasse variieren können. Die Abbildung 2 zeigt exemplarisch eine Aufteilung der Spannungsgrenzwerte. Schon ab rund 13 V können für den Fahrer wahrnehmbare Effekte wie Lüftergeräusche oder Lichtflackern auftreten.

Mehrspannungsbordnetze erhöhen die Leistung, aber auch die Komplexität

Mit der Einführung des Hybridantriebes entstanden neue Spannungsnetze mit zwei Spannungsebenen. Bei Fahrzeugen mit Hochvoltbatterie für die Antriebsenergie übernimmt ein DC-DC-Wandler anstelle des Generators die Aufgabe der Stromversorgung für die Niedervoltseite, er transformiert die höhere Spannung im Bordnetz auf die gewünschte Spannung der Niedervoltseite. Im Gegensatz zum Generator kann ein DC-DC-Wandler den Strom mit mehreren Zehntausend Amperesekunden ausregeln und so der Stromanforderung der Hochstromkomponenten gerecht werden. ›

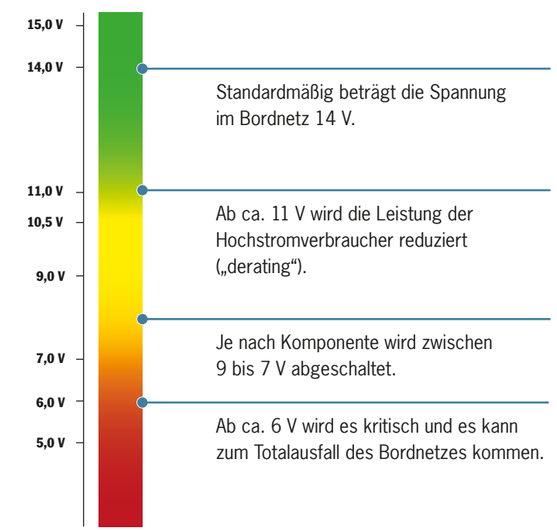


Abbildung 2: Spannungsgrenzen für Hochstromverbraucher

Der steigende Energiebedarf im Bordnetz führt auch zu einem höheren Kraftstoffverbrauch. Hier werden große Anstrengungen unternommen, diesen so weit wie möglich zu verringern. In diesem Zusammenhang werden die von der Hochvoltseite bekannten Speichertechnologien wie Lithium-Ionen-Batterie oder Doppelschicht-Kondensator aufgrund ihres hohen Wirkungsgrades und damit geringerer Verluste für die Niedervoltseite immer interessanter. Diese Speicher können beispielsweise auch auf der Niedervoltseite Bremsenergie aufnehmen (Rekuperation).

Der Wirkungsgrad von Komponenten lässt sich aber auch durch die Variation der elektrischen Größen steigern. Bei einer geforderten Leistung kann, wenn die Spannung steigt, der Strom gesenkt werden (da der Strom im Gegensatz zur Spannung quadratisch in die Verlustberechnung eingeht, bedeutet eine Verdoppelung des Stroms das Vierfache an Verlusten). Ein weiterer Vorteil ist, dass Kabel mit geringeren Querschnitten verwendet werden können, was wiederum für eine Gewichtseinsparung sorgt. Dies wirkt sich positiv auf den Kraftstoffverbrauch aus. Auch die Verlustleistung, die in Form von Wärme abgeführt werden muss und oft ein Problem darstellt, wäre um einiges geringer.

Aus diesem Grund gibt es das Bestreben, vom 12-V-Bordnetz auf das 48-V-Bordnetz umzustellen. Da diese Umstellung auch in den Serienprozess überführt werden muss und es aktuell kaum Komponenten gibt, bei denen man auf jahrelange Erfahrungen zurückblicken kann, ist dies mit entsprechendem Entwicklungsaufwand und Kosten verbunden. Deshalb wird es zunächst nur zu einer schrittweisen Einführung des 48-V-Bordnetzes kommen. Es bietet sich an, zunächst Hochstromverbraucher wie die Servolenkung ins 48-V-Bordnetz zu integrieren, da diese am meisten von einem höheren Wirkungsgrad und weniger Abwärme profitieren. Die Bordnetze unterschiedlicher Spannungsniveaus sind dann aber zu koppeln.

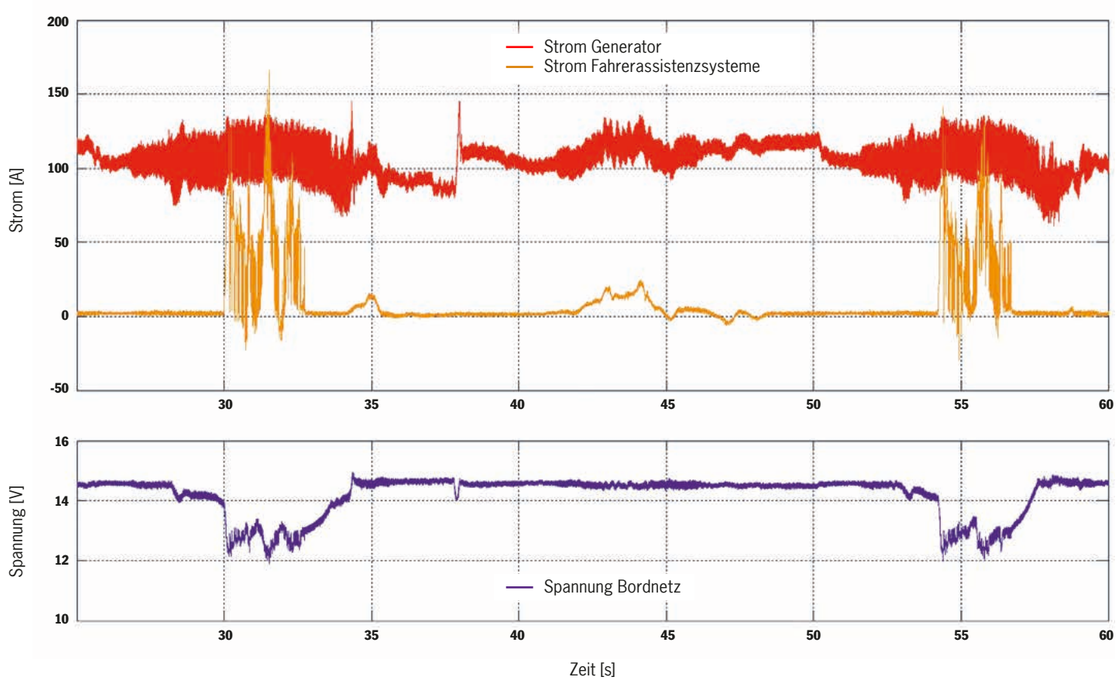


Abbildung 3: Exemplarischer, überlagerter Strombedarf von Hochstromverbrauchern (ESC, EPS etc.) im Manöver „gebremster doppelter Spurwechsel“

Die Variantenvielfalt an Funktionen, Komponenten und Spannungsniveaus hat den Freiheitsgrad bei der Bordnetzauslegung signifikant erhöht. Um schon in der frühen Entwicklungsphase alle kritischen Pfade in Funktionen, Komponenten und unter Umweltbedingungen zu identifizieren, ist es unabdingbar, das entsprechende Zielsystem vorab zu analysieren. Aufgrund der immer weiter anwachsenden Komplexität ist dies ohne entsprechende Simulation der Komponenten, der Umgebung und der Rückwirkung der Komponenten untereinander nicht mehr möglich. Die hohe zeitliche Auflösung, die für die Analyse des Spannungsverhaltens im Bordnetz bei aktiven Fahrerassistenzsystemen notwendig ist, erfordert transiente Modelle (physikalische Modellierung). Anhand dieser Analyse können die Entwicklungszeiten verkürzt und die Kosten gesenkt werden.

Die Arten der Bordnetzsimulation

Wenn das System „Bordnetz“ über die Simulation analysiert werden soll, richtet sich die Art und die Komplexität der Modelle nach den zu untersuchenden Fragestellungen. Modelle können statischer Natur sein. Das bedeutet, Komponenten werden jeweils in ihrem eingeschwungenen Betriebszustand abgebildet wie beispielsweise das Kennfeld eines Generators. Andererseits können Modelle physikalischer Natur sein, wenn sie auch die Dynamik, also den Übergang von einem eingeschwungenen Zustand in den anderen, abbilden. Der Unterschied liegt nicht nur in der Genauigkeit, dem Aufwand der Erstellung und den notwendigen Parametern, sondern auch in der Simulationsleistung. Teilweise bietet es sich an, beide Arten der Modellbildung zu kombinieren. Ob eine Simulation mit Bordnetzumgebung oder eine gekapselte Bordnetzsimulation sinnvoll ist und welche Komponenten in welcher entsprechenden zeitlichen Auflösung berechnet werden, hängt immer von der jeweiligen Aufgabe ab. Porsche Engineering analysiert das Bordnetz nach Kundenwunsch und verfügt über die Kompetenz, das passende Modell zu jedem Entwicklungsgrad des Fahrzeugs zu generieren.

Verschiedene Wege der Modellerstellung

Je nach Entwicklungsgrad des Fahrzeuges differieren die vorhandenen Informationen zu den Komponenten und Systemen und damit auch die Simulationsmodelle. Trotzdem müssen schon vor dem Bau der ersten Prototypen belastbare Aussagen über das Spannungsverhalten im Bordnetz getroffen werden, da Änderungen im Nachgang hohe Kosten verursachen können. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, mit fehlenden wichtigen Daten umzugehen. Bei bereits verwendeten Komponenten stehen gegebenenfalls bereits existierende Modelle ersatzweise zur Wahl. Ist dies nicht der Fall, können auf der Basis vorhandener oder durch Messung ermittelter Komponentenparameter Modelle erstellt werden.

Handelt es sich um eine neue Komponente und sind die möglichen Zulieferer bekannt, werden von diesen erste Werte angefordert. Eventuell stellt der Zulieferer sogar ein gekapseltes Modell von seiner Komponente zur Verfügung. Liegt beispielsweise der Strombedarf eines elektrischen Bremskraftverstärkers bei verschiedenen Spannungslagen vor, verarbeitet die Simulation diese Parameter bei der Berechnung des Bordnetzmodells. Sind die Zulieferer nicht bekannt, können vergleichbare Komponenten und deren Modelle mit entsprechenden Anpassungen herangezogen werden. Die jeweiligen Komponentenexperten sind in jeder Phase dabei eingebunden. Mit ihrem Know-how lässt sich zugleich der richtige Testzyklus entwickeln, um die maximale Strombelastung, etwa bei einem gebremsten Spurwechsel, zu bestimmen.

Energiebilanz als Basis der Bordnetz-Absicherung

Der erste Schritt ist eine Energiebilanzierung. Dazu dient die Simulation mit den Zielkomponenten in einem bestimmten Zyklus, zum Beispiel dem Stadtverkehr unter Bedingungen, wie sie auch im realen Fahrzeug herrschen. Es werden hier mehrere Minuten mit Modellen simuliert, die in der Regel eine zeitliche Auflösung von wenigen Millisekunden bis Sekunden haben. Das Ergebnis zeigt, ob nach der Fahrt die Energie in der Batterie noch ausreichend ist, um das Fahrzeug erneut zu starten. Sollte das nicht der Fall sein, werden die Komponenten in ihrer Leistung verändert und es erfolgt eine erneute Simulation.

Diese Art der Betrachtung ist indes nicht ausreichend, um das Bordnetz abzusichern. Die Hochstromverbraucher unter den Fahrerassistenzsystemen benötigen im Mittel einen geringen Strom, weisen in Aktion jedoch oft sehr hohe dynamische Spitzen auf. Bei der dynamischen Analyse liegt der insgesamt betrachtete Zeitraum im Sekundenbereich und die Modelle haben eine zeitliche Auflösung von wenigen Mikrosekunden. Ein exemplarischer Verlauf des überlagerten Stroms verschiedener Hochstromverbraucher ist in der Abb. 3 dargestellt.

Dynamische Analyse am Beispiel eines DC-DC-Wandlers

Neue Sicherheitsanforderungen verlangen, dass das Fahrzeug auch bei alleiniger Versorgung durch Generator, DC-DC-Wandler oder Batterie bis zum Stillstand funktionsfähig bleibt. Ein Simulationsfall ist deshalb die Annahme, dass die Batterie defekt ist und ›

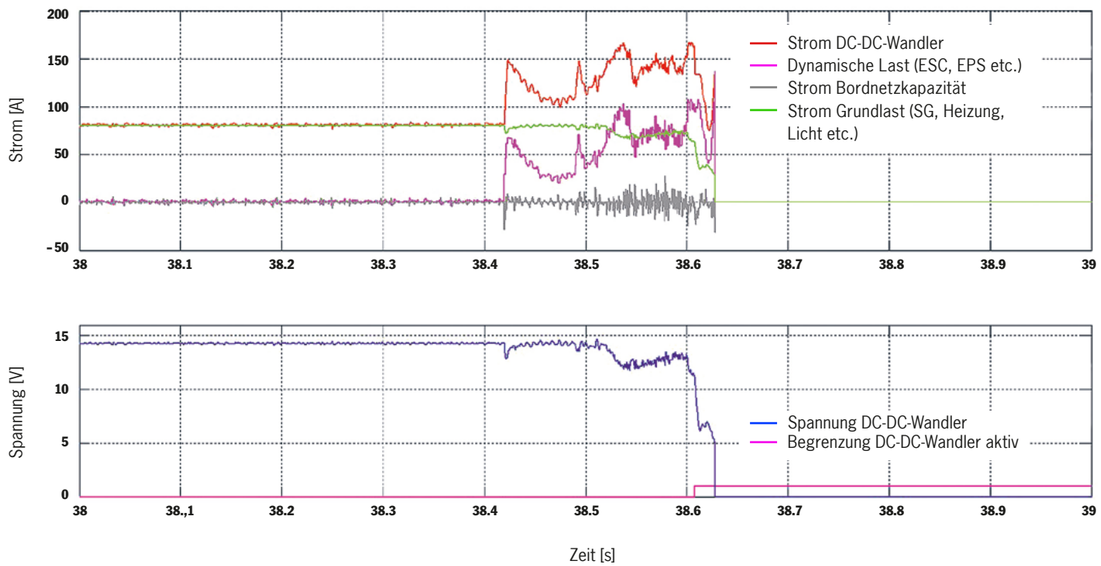


Abbildung 4: Stromverlauf im Bordnetz mit einem 2 kW starken DC-DC-Wandler bei Totalausfall im Manöver „gebremster Spurwechsel (Ausweichmanöver Tier)“

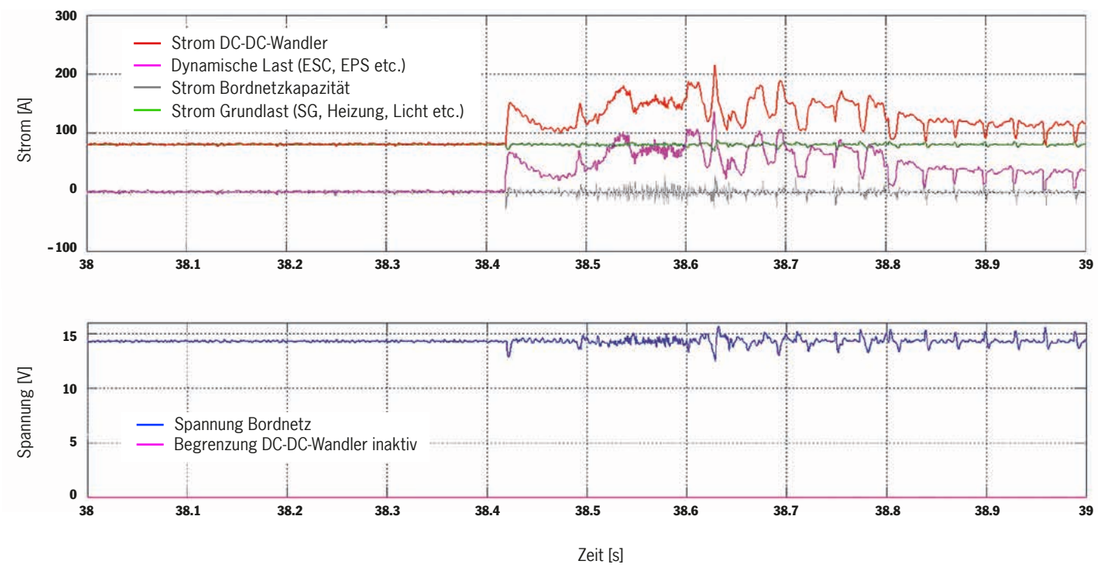


Abbildung 5: Stromverlauf im Bordnetz mit einem 3 kW starken DC-DC-Wandler

nur der DC-DC-Wandler Energie liefert. Im ersten Schritt erfolgt dabei die Simulation mit den Zielkomponenten (Abb. 4). Als Testzyklus dient der gebremste Spurwechsel („Ausweichmanöver Tier“). Die charakteristischen Größen, die einen DC-DC-Wandler beschreiben, sind unter anderem seine Nennleistung (im Beispiel 2 kW), sein Ein- und Ausgangsspannungsbereich, der Temperaturbereich, in dem er betrieben werden darf, und das Verhalten oberhalb des Nennstroms. Die Aufgabe des Wandlers besteht darin, die Spannung konstant auf einem Sollwert (im Beispiel 14,3 V) zu halten.

Weicht die Ist-Spannung (im Beispiel blau) im Bordnetz von der Soll-Spannung ab, passt der Wandler seinen Ausgangsstrom so an, dass sich die gewünschte Spannung wieder einstellt. Kurzzeitig vermag er bei hohem Strombedarf in Überlast zu gehen, das bedeutet aber, dass er mehr als seinen Nennstrom bereitstellt. Der Betrieb über dem Nennstrom hat jedoch zur Folge, dass der DC-DC-Wandler sich über den erlaubten Bereich hinaus erwärmt. Um keine thermische Zerstörung herbeizuführen, erfolgt nach einer definierten Zeit oder ab einer bestimmten Temperatur die Begrenzung des Stroms auf den Nennwert, bis die Grenztemperatur unterschritten wird.

Der DC-DC-Wandler enthält regulär einen kapazitiven Speicher in Form eines Kondensators, um die Ausgangsspannung zu stabilisieren. Zusammen mit dem Kabelsatz und den internen Speichern der Steuergeräte steht des Weiteren ein sehr kleiner Speicher zur Verfügung, der als „Lastpuffer“ dienen kann. Die Spannung im Bordnetz wird aber auch durch parasitäre Größen wie Kabelwiderstand oder Induktivität beeinflusst, weshalb diese auch mit zu berücksichtigen sind.

Der Stromverlauf der Simulation ist grau dargestellt. Die Grundlast (grün), die sich hier durch die Versorgung der Steuergeräte, das eingeschaltete Licht und andere Verbraucher ergibt, beträgt 80 A. Durch die zusätzliche dynamische Stromanforderung der Hochstromverbraucher (Magenta) entsteht ein Leistungsmangel im Bordnetz. Diesem versucht der DC-DC-Wandler mit Erhöhung des Stroms bis in den Überlastbereich entgegenzuwirken, kann aber nicht genug Strom einspeisen, um die Spannung auf den gewünschten Sollwert zu heben. Unterschreitet nun diese Spannung die Mindestspannung der Steuergeräte, kommt es zum Totalausfall des Bordnetzes. Das Resultat: Der DC-DC-Wandler mit einer Leistung von zwei Kilowatt ist für diese Belastung als singulärer Versorger nicht geeignet.

Im nächsten Schritt erfolgt die Simulation mit einem drei Kilowatt starken DC-DC-Wandler (Abb. 5). Dieser erfüllt die Stromanforderung und die Bordnetzspannung bleibt auf einem akzeptablen Wert. Bei der Versorgung durch einen Generator würde das Ergebnis anders aussehen, da seine Regelgeschwindigkeit viel geringer ist. Dort wird das Problem mit der Erhöhung der Komponentenleistung nicht gelöst. Das Spannungsverhalten beim Abwurf von Verbrauchern oder die Stabilisierung durch zusätzliche Energiespeicher wie Doppelschichtkondensatoren wären weitere mögliche Untersuchungspunkte.

Bei der Analyse der Ergebnisse gilt für diese wie auch für alle anderen Simulationen: Es ist nicht nur wichtig, das Modell in hinreichender Modelltiefe und Genauigkeit entsprechend der Aufgabe zu erstellen, sondern auch die Grenzen der Modelle zu kennen, damit beim Auswerten zwischen physikalischen und modellspezifischen Einflüssen unterschieden werden kann.

Fazit: Die zügige Entwicklung komplexer Bordnetze erfordert Simulationen

Der Leistungsbedarf steigt aufgrund der steigenden Elektrifizierung stetig an. Die alleinige Absicherung des Bordnetzes über die Erhöhung der Leistung von Komponenten wie Generator und Batterie ist durch die hohe dynamische Belastung durch die Hochstromverbraucher nicht mehr möglich. Gleichzeitig halten von der Hochvoltseite her bekannte Komponenten wie Lithium-Ionen-Zellen Einzug ins Niedervolt-Bordnetz. Mehrspannungsbordnetze erhöhen die Komplexität noch einmal signifikant. Für die zuverlässige Auslegung künftiger Bordnetze ist eine entsprechende dynamische Analyse und Absicherung über die Simulation daher unabdingbar. ■

Intelligent gesteuert

Entwicklung eines Steuergeräts für Elektro- und Hybridfahrzeuge

____ Das Aufkommen alternativer Antriebsstränge stellt Fahrzeugingenieure vor neue Herausforderungen. Das gesamte Antriebskonzept für moderne Autos muss neu durchdacht werden, um Effizienz- und Leistungsziele entsprechend erreichen zu können. Mit einem universellen Steuergerät für jede Art von Elektro- und Hybridfahrzeugen, dem EV-Manager, begegnet Porsche Engineering diesen Herausforderungen und ermöglicht die flexible und schnelle Entwicklung von Software-Architekturen und -Funktionen für den Antriebsstrang der Zukunft.

Von Dr. Ondrej Spinka, Dr. Martin Rezac und Dr. Jan Rathousky

Der EV-Manager und seine Architektur

Der Electric Vehicle Manager (EV-Manager) ist ein konfigurierbares elektronisches Steuergerät für jede Art von Elektro- und Hybridfahrzeugen. Es steuert den Antriebsstrang auf intelligente Art und Weise je nach Anforderung des Fahrers durch Pedale, Schalthebel oder Zündung. Es handelt sich hierbei um ein automotives Standard-Steuergerät, welches typischerweise an Netzwerken wie Antriebs- und Hybrid-CAN betrieben wird und dort unterschiedliche Funktionen mit zusätzlichen Sensoren und Aktuatoren ausführt (vgl. Abbildung auf Seite 45).

Abgesehen von den Hauptfunktionen der Antriebsstrangsteuerung und Drehmomentberechnung bietet der EV-Manager unter anderem folgende Funktionen:

> Hochvolt-(HV-)Batterie-Lademanagement,
> Energiefluss-Management,
> Reichweitenberechnung,
> Geschwindigkeitsregelung,
> HMI (Human Machine Interface) einschließlich Meldungen vom Kombiinstrument oder den Kontrollleuchten,
> Bremskraftverstärker-Steuerung und Bremskraftverteilung,
> Thermomanagement (Regelung des Kühlsystems),
> Heizung und Klimaanlage im Fahrgastraum.

All diese und weitere Funktionen können je nach Kundenwunsch hinzugefügt oder implementiert werden. Das hohe Maß der Konfigurierbarkeit wird durch den modularen Aufbau ermöglicht, der durch die Verwendung einer Bibliothek an Softwaremodulen die schnelle Anpassung des EV-Managers an den Kundenbedarf für eine bestimmte Antriebsstrang- und Fahrzeugkonfiguration ermöglicht. Diese Module können – ähnlich wie Lego-Steine – in Simulink konfiguriert und miteinander verbunden werden. Dieser Aufbau wird genutzt, um den C-Code zu erzeugen und ihn automatisch für das jeweilige Steuergerät zu kompilieren.

Die modulare Struktur eines allgemeinen EV-Managers wird auf Seite 46 dargestellt. Die Software ist in mehreren Schichten aufgebaut, welche die einzelnen Ebenen der Fahrzeug-Hardware abstrahieren. Diese werden als *Schicht der Basisalgorithmen, Fahrzeugschicht* und *Steuergeräteschicht* bezeichnet.

Die *Schicht der Basisalgorithmen* ist für Funktionen wie die Drehmomentberechnung, die Zustandsmaschine für den Antriebsstrang oder die Reichweitenberechnung zuständig. Hierbei handelt es sich um die oberste Schicht der Software, die im Wesentlichen fahrzeugunabhängig und daher leicht wiederzuverwenden ist.

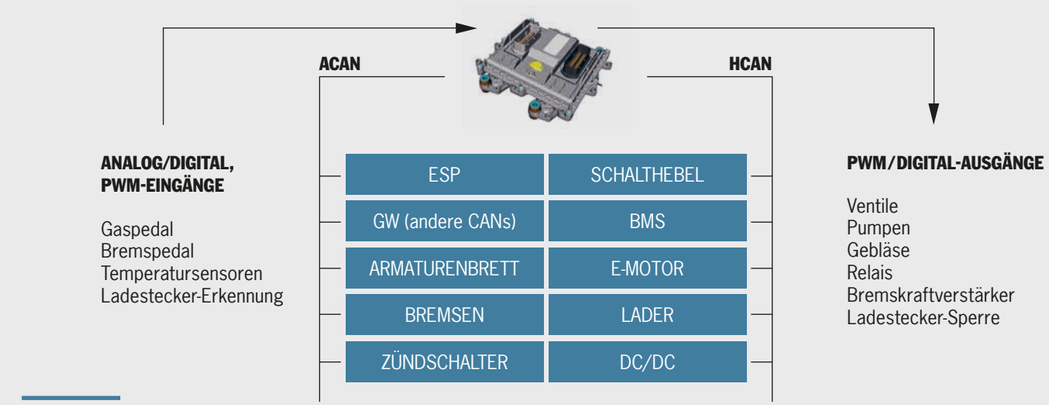
Die *Fahrzeugschicht* dient als Schnittstelle zwischen den Kernfunktionen und einer bestimmten Fahrzeugplattform, die das Hinzufügen kundenspezifischer Funktionen wie Thermomanagement, Fahrerinformationen, HV-Batterie-Lademanagement oder Beheizung des Fahrgastraums ermöglicht. Bei einem Austausch des Batterie-Managementsystems (BMS) oder des E-Motors muss z. B. nur eine einzelne Komponente dieser Schicht geändert werden, ohne dass weitere Änderungen an der verbleibenden Software erforderlich sind.

Die *Steuergeräteschicht* bietet eine Schnittstelle zwischen der EV-Manager-Software und der systemnahen Software, die auf dem Ziel-Steuergerät verwendet wird. Diese Schicht ermöglicht den unabhängigen Betrieb der restlichen Software des jeweiligen Steuergerätes. CAN-Nachrichten müssen in dieser Schicht analysiert und in Signale mit physikalischen Einheiten konvertiert werden, um in den höheren Schichten des EV-Managers verarbeitet zu werden. Falls eine CAN-Matrix in einem entsprechenden Datenbank-Format (DBC) verfügbar ist, kann diese Schicht automatisch erzeugt werden. Der EV-Manager kann mit einer Steuergeräteschicht mit einer Verknüpfung zur systemnahen Software (Bereitstellung durch Steuergerät-Lieferanten) oder alternativ in Form eines AUTOSAR-Moduls mit einer eindeutig definierten AUTOSAR-RTI (RTI, echtzeitfähige Schnittstelle) ausgeliefert werden.

Einer der Hauptfaktoren für schnelle Softwareentwicklung ist die Methodik zur Festlegung der gesamten Architektur. Sämtliche Schnittstellen zwischen den Strukturbauteilen werden in Form einer Liste mit Signalen in IBM DOORS gespeichert. Diese Liste ermöglicht eine standardisierte Definition der Schnittstellen und wird zur automatischen Erstellung von Komponenten-Schnittstellen direkt in Matlab/Simulink herangezogen; dieser Prozess dient zur automatischen Softwaredokumentation sowie zum Anlegen von MIL (model in the loop)-Prüfvorlagen. Sämtliche Änderungen an der Architektur werden ausschließlich in DOORS durchgeführt, während der restliche Prozess ihre korrekte Umsetzung sicherstellt.

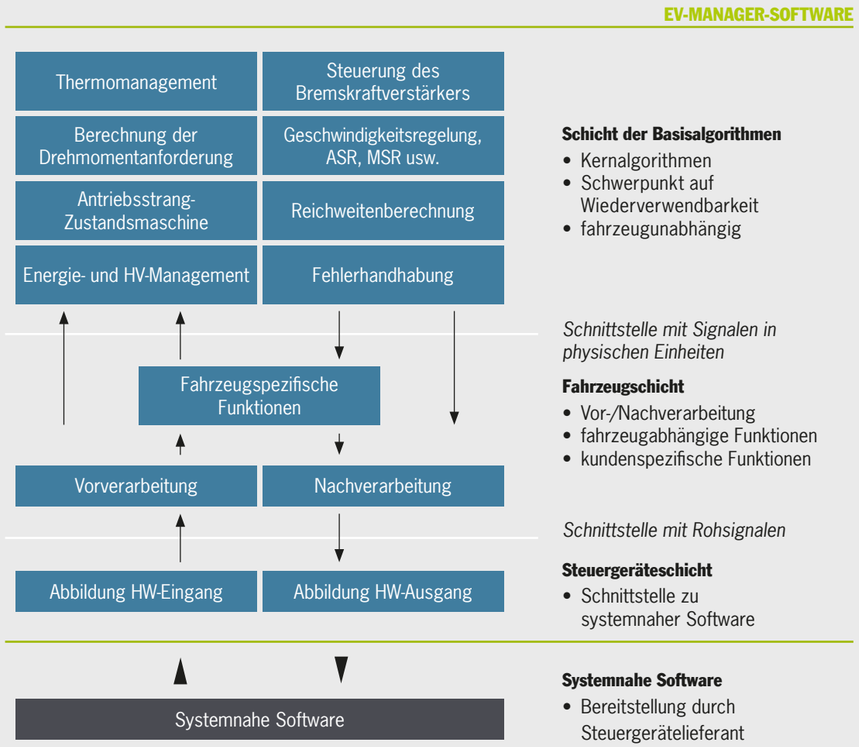
Die Kernfunktionen des EV-Managers

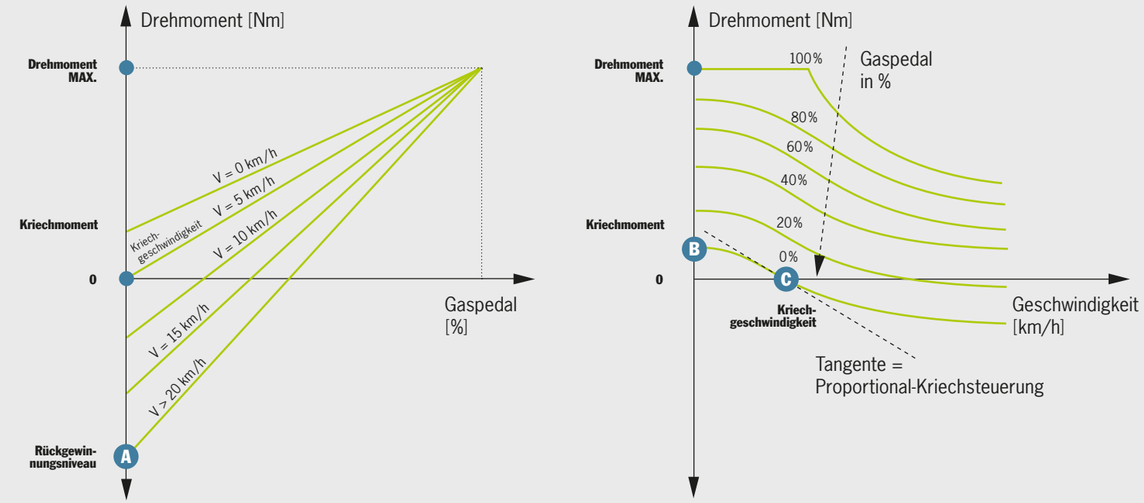
Eine der wichtigsten Funktionen des EV-Managers ist die Berechnung des Drehmoments, das durch einen oder mehrere ›



ACAN = Antriebs-CAN
HCAN = Hybrid-CAN

Typische Hardwareschnittstelle des EV-Managers in einem Fahrzeug – zwei CAN-Busse und mehrere analoge oder digitale Eingänge und Ausgänge





Drehmomentverläufe (in Abhängigkeit Gaspedal)

- **A** *Ein Punkt für das „Rekuperationsniveau" ändert seinen Wert gemäß dem ausgewählten Rekuperationsniveau (dieser Vorgang wird in der Regel im manuellen Modus realisiert).*
- **B** *Das „Kriechmoment" bezeichnet den maximalen Drehmomentwert für die Kriechfunktion – dieses Drehmoment wird bei einer Geschwindigkeit gleich „null" bei freigegebenem Gaspedal angelegt.*
- **C** *Der Punkt „Kriechen aus" stellt sich bei einer bestimmten Geschwindigkeit ein (in diesem Fall bei 5 km/h).*

Drehmomentverläufe (in Abhängigkeit Fahrzeuggeschwindigkeit)

Die Tangente zwischen den Punkten „Kriechmoment" und „Kriechen aus" gibt die Funktionsweise der Proportional-Kriechsteuerung wieder (bei niedrigeren Geschwindigkeiten ist ein gewisses Kriechmoment erforderlich, während bei höheren Geschwindigkeiten ein Null-Drehmoment oder sogar eine Rückgewinnung erforderlich ist – negatives Drehmoment bedeutet Rückgewinnung).

E-Motoren erzeugt werden soll. Dazu wird die gegenwärtige Position des Gaspedals ausgelesen und das zu erzeugende Drehmoment in Abhängigkeit von der aktuellen Geschwindigkeit und weiteren Fahreinstellungen berechnet. Das Drehmoment kann bei einer notwendigen Beschleunigung positiv, bei einer erforderlichen Rekuperation jedoch auch negativ sein.

Die Bedingungen zur Regelung der Drehmomenterzeugung sind äußerst komplex, und dem Auftraggeber steht die Festlegung des dynamischen Fahrverhaltens gemäß den Anforderungen größtenteils frei. So können beispielsweise die vollständigen Verläufe für Gaspedal/Geschwindigkeit/Drehmoment geändert werden. Diese werden in der Abbildung auf Seite 47 vereinfacht dargestellt.

Der Auftraggeber kann mithilfe dieser Verläufe auch das sogenannte Kriechverhalten definieren. Die Kriechsteuerung wird, so wie sie in Fahrzeugen mit Automatikgetriebe zum Einsatz kommt, von Kunden häufig angefragt. Zu den weiteren Funktionen, die kalibriert und aktiviert werden können, zählen unter anderem Fahrprofile (Betriebsart ECO/SPORT/SPORT+) oder die sogenannte Bremskraftverteilung (brake-blending). Es können selbstverständlich auch Funktionen wie Tiefpass-Drehmomentfilter sowie eine Begrenzung des Drehmoments zur Verbesserung des Fahrverhaltens integriert und vollständig kalibriert werden.

Die Kombibremse ermöglicht dem Fahrer, das Rekuperationsdrehmoment durch Betätigen des Bremspedals zu steuern. Diese Funktion stellt sicher, dass die Reaktion auf das Bremspedal (d. h. das Bremsmoment) unverändert bleibt, unabhängig davon, ob sie durch einen mechanischen Bremsvorgang oder eine Rekuperation angefordert wird. Das Bremsmoment wird hierbei zwischen E-Motor und hydraulischer Bremse aufgeteilt, wobei sich das Verhältnis ständig ändert. Bei dieser Funktion sind eine elektrische und eine externe Unterstützung zur Ansteuerung des Bremszylinderdrucks erforderlich. Bei einem langsamen Betätigen des Bremspedals wird beispielsweise ein erheblicher Anteil der Bremskraft letztendlich durch die Rekuperation erzeugt. Beim plötzlichen und kraftvollen Betätigen des Bremspedals wird die Rekuperation abgeschaltet und die Bremswirkung wird vollständig über die normale Hydraulikbremse erzeugt.

Die Haupt-Zustandsmaschine für elektrischen Antriebsstrang, Energie- und HV-Management

Diese Funktion ist für die Zustandsmaschine des gesamten elektrischen Antriebsstrangs verantwortlich. Im EV-Manager findet der Übergang zwischen den verschiedenen Zuständen wie „Zündung ein/aus", „Fahrbereit", „Kriechen", „Fahren" oder „Laden" statt. Die in Simulink/Stateflow implementierte Zustandsmaschine stellt anschließend sicher, dass der entsprechende Übergang nur bei Erfüllung sämtlicher Voraussetzungen ausgeführt wird. Beispiel: Wird das Ladekabel nach dem Starten angeschlossen, wird der Übergang von „Zündung ein" zu „Fahrbereit" verhindert. Die Energiemanagement-Funktion stellt dann die korrekte Verteilung zwischen den Hochvolt-Strukturbauteilen (d. h. E-Motor/en, Batterie, Heizung und Klimaanlage, DC/DC-Wandler) sicher. Der Energiemanager muss die Anforderungen von all diesen Untersystemen freigeben und erstellt jeweils Prioritäten oder Einschränkungen für den Fall, dass nicht alle Systeme versorgt werden können.

Der HV-Manager schaltet die Spannung der Traktionsbatterie auf EIN und AUS. Die Schaltvorgänge sind relativ komplex, ›

und daher muss eine gewisse Anzahl an Sicherheitsaspekten berücksichtigt werden. Der HV-Manager kann beispielsweise den Status von BMS, E-Motor und Fahrzustand bewerten, um ein Abschalten der HV-Versorgung während der Fahrt zu verhindern. Andererseits kann er im Fall von Problemen mit dem E-Motor oder anderer HV-Ausrüstung das Einschalten des HV verhindern.

Berechnung der Reichweite als wesentliche Fahrerinformation

Die Berechnung der Reichweite umfasst eine ganze Reihe von Funktionen, welche die Schätzwerte für den aktuellen und durchschnittlichen Energieverbrauch des Fahrzeugs (in kWh/100 km) und die Reichweite (in km) ermitteln. Der Algorithmus basiert auf einem gleitenden Durchschnittswert, während vorherige Werte mit einer niedrigeren Priorität berücksichtigt werden. Die für die Analyse herangezogene Zeitkonstante kann ebenfalls gemäß den Kundenanforderungen kalibriert werden. Der Hauptvorteil bei diesem Umsetzungsverfahren ist die Tatsache, dass der Algorithmus nicht zurückgesetzt werden muss, nachdem das Fahrzeug über eine große Distanz gefahren wurde.

Die HMI-Schnittstelle auf Android-Basis

In der Regel ist das im Armaturenbrett integrierte Computerdisplay nur in der Lage, Fahrzeuginformationen auf einem kleinen Bildschirm und in begrenztem Umfang darzustellen. Um die Leistungsfähigkeit des EV-Managers zu verdeutlichen, wurde eine zusätzliche hochleistungsfähige HMI-Schnittstelle (Human Machine Interface) für die Mittelkonsole entwickelt. Diese Art HMI ermöglicht es, eine Vielzahl benutzerdefinierte und konfigurierbare Fahrzeuginformationen auf mehreren Registerkarten auf einem großen, hochauflösenden Bildschirm anzuzeigen. Der Wechsel zwischen den vollständig konfigurierbaren Registerkarten ist hierbei gezielt einfach gehalten.

Das Android-Betriebssystem ist für seine Betriebsfestigkeit und Flexibilität bekannt – diese Vorzüge waren ausschlaggebend für die Auswahl dieser Plattform für die HMI. Die HMI wird auf einem großen Tablet betrieben, das über Bluetooth mit einem Schnittstellen-Steuergerät (SSG) als Bluetooth-CAN-Gateway verbunden ist. Das SSG wurde 2012 von Porsche Engineering entwickelt (siehe Porsche Engineering Magazin 2/2012). Es wird direkt an einem der CAN-Netzwerke im Fahrzeug angeschlossen. Die HMI wird intensiv zur Bewertung, Überprüfung und Unterstützung des EV-Managers sowie für höheren Fahrerkomfort während einer Fahrt eingesetzt.

Inbetriebnahme und Kalibrierung

Der EV-Manager wurde bereits erfolgreich in einer Reihe von Kundenprojekten sowie internen Projekten bei Porsche Engineering eingesetzt. Das Fahrzeug wurde mithilfe eines Rollenprüfstands in Betrieb genommen und kalibriert (siehe Foto unten), bevor die eigentlichen Testfahrten durchgeführt wurden.

Fazit

Der von Porsche Engineering entwickelte EV-Manager stellt eine flexible und wirkungsvolle Lösung für alle Arten von Elektro- und Hybridfahrzeugen dar. Der modulare Aufbau ermöglicht eine schnelle Entwicklung der Softwarearchitektur und -funktionen, die den Kundenwünschen passgenau entsprechen. ■

Kalibrierung eines Fahrzeugs auf dem Rollenprüfstand

IMPRESSUM

Porsche Engineering
MAGAZIN

AUSGABE 2/2015

HERAUSGEBER
Porsche Engineering Group GmbH
Porschestraße 911
71287 Weissach
Tel. +49 711 911 0
Fax +49 711 911 8 89 99
Internet: www.porsche-engineering.de

REDAKTIONSLEITUNG
Frederic Damköhler
REDAKTION | KOORDINATION
Nadine Guhl
ANZEIGEN
Frederic Damköhler
GRAFISCHE GESTALTUNG
VISCHER&BERNET, Stuttgart
ÜBERSETZUNG
RWS Group Deutschland GmbH, Berlin
GESAMTHERSTELLUNG
Übelmesser Druck, Stuttgart

Alle Rechte vorbehalten. Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung des Herausgebers. Für die Rücksendung unverlangt eingegangener Fotos, Dias, Filme oder Manuskripte kann keine Gewähr übernommen werden. Porsche Engineering ist eine 100%ige Tochtergesellschaft der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG.

FSC
www.fsc.org
MIX
Papier aus verantwortungsvollen Quellen
FSC® C106855

www.porsche-engineering.de

beaufort8.de

Automotive ist für viele Berater Neuland.

Für uns Heimweg.

Mit MHP – Ihrem Prozesslieferanten – kommen Sie schneller und sicherer zum Ziel. Unser Antrieb ist dabei die perfekte Symbiose aus Management- und IT-Beratung. Kein Wunder, sind wir aktuell mit unseren über 1.500 Mitarbeitern für 250 Kunden – darunter die Mehrheit der Top 50 Automobilunternehmen – eine vertraute Adresse.

Ihre zielführende Orientierung finden Sie unter: www.mhp.com

MHP
A PORSCHE COMPANY

Excellence in Management- and IT-Consulting for Automotive.

Deutschland | Schweiz | USA | China | Rumänien