

Porsche Engineering

MAGAZIN

KUNDEN & MÄRKTE Sportwagenentwicklung der Zukunft und innovative Ingenieurdienstleistungen
TRENDS & TECHNOLOGIEN Reales Fahrgefühl am virtuellen Fahrerplatz
ENGINEERING INSIGHTS Numerische Modelle für einfachere Applikation

AUSGABE 2/2016

www.porsche-engineering.de

DYNAMISCH

Fahrwerkentwicklung für heute und morgen



www.porsche-engineering.de

Angetrieben. Von Leidenschaft und Technik.

Das GreenTeam der Universität Stuttgart auf Erfolgskurs.

Porsche Engineering gratuliert zur gelungenen Rennsaison 2016.

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,

_____ erinnern Sie sich noch an Ihre Jugend und die technischen Fortschritte der letzten Jahrzehnte? Wir haben die Entwicklung von der Kompaktkassette über Compact Disc bis hin zum digitalen Download erlebt. Denken Sie an den Moment, als Sie Ihr erstes Fax und später Ihre erste E-Mail versendet haben. Wann haben Sie Ihr erstes digitales Foto geschossen und den guten alten Silberfilm beiseitegelegt? Das alles ist noch gar nicht lange her – heute tragen die meisten von uns ein Smartphone zur ultimativen Kommunikation inklusive Musikplayer und Kamera mit sich.

Wir sind die Kinder der Digitalisierung und viele von uns haben die Entwicklungen von klein auf begleitet. Trotzdem, gerade in einer sich immer schneller verändernden Welt von digitalen Errungenschaften bedeuten uns physische Erlebnisse mehr denn je: Ob eine Fahrt im Sportwagen über die Nordschleife des Nürburgrings oder ein gemeinsames Essen mit Freunden – wir schätzen bei allem Digitalen auch das Analoge. Die immer wieder stattfindende Kombination von Neuem mit dem Altbewährten ist der eigentliche Reiz der Zukunft.

Und so widmen wir uns in dieser Magazinausgabe einer klassischen Porsche-Kernkompetenz – der Fahrdynamik – und kombinieren sie mit aktuellen Entwicklungen der digitalen Transformation. Die Sportwagen von Porsche zeichnet eine optimale Fahrwerksauslegung für maximale Fahrdynamik aus, diese bewährte Qualität und einzigartige Performance erweitern wir um neue Möglichkeiten im Zuge der Digitalisierung und berücksichtigen gleichzeitig veränderte Rahmenbedingungen.

Erfahren Sie in dieser Ausgabe mehr darüber, wie Porsche und die Porsche-Kundenentwicklung Tradition und Innovation vereinen.

Wir wünschen Ihnen viel Spaß beim Lesen.

Ihr Malte Radmann und Ihr Dirk Lappe



30

TRENDS & TECHNOLOGIEN VIRTUELLER FAHRERPLATZ

*Reales Fahrgefühl durch optimierte Simulation:
Mit dem virtuellen Fahrerplatz verfügt Porsche über ein
hochmodernes Entwicklungswerkzeug, um die Verbindung
zwischen Fahrer und Fahrzeug weiter zu verbessern.*



12



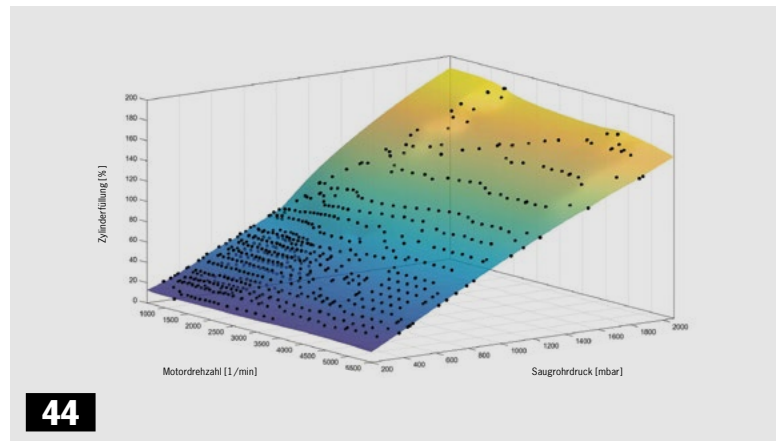
18



26



36



44

FAHRDYNAMIK

12 Optimale Performance

Wie Porsche performanceorientierte Fahrwerke auslegt

18 Intelligente Lösung

Entwicklung eines Vorderachsliftsystems für den Porsche 911

22 Effizientes Testing

Individuelle Prüfstände für optimale Steuergeräteentwicklung

KUNDEN & MÄRKTE

26 Technologie, Zukunft, Tradition.

Dr. Michael Steiner, Porsche AG, und Malte Radmann, Porsche Engineering, im Gespräch

TRENDS & TECHNOLOGIEN

30 Virtueller Fahrerplatz

Reales Fahrgefühl durch optimierte Simulation

36 GreenTeam mit Porsche-Genen

Ingenieurnachwuchs bewährt sich im Rennwagenbau

PORSCHE HAUTNAH

40 Nachhaltigkeit trifft auf Performance

Der Porsche Panamera 4 E-Hybrid

ENGINEERING INSIGHTS

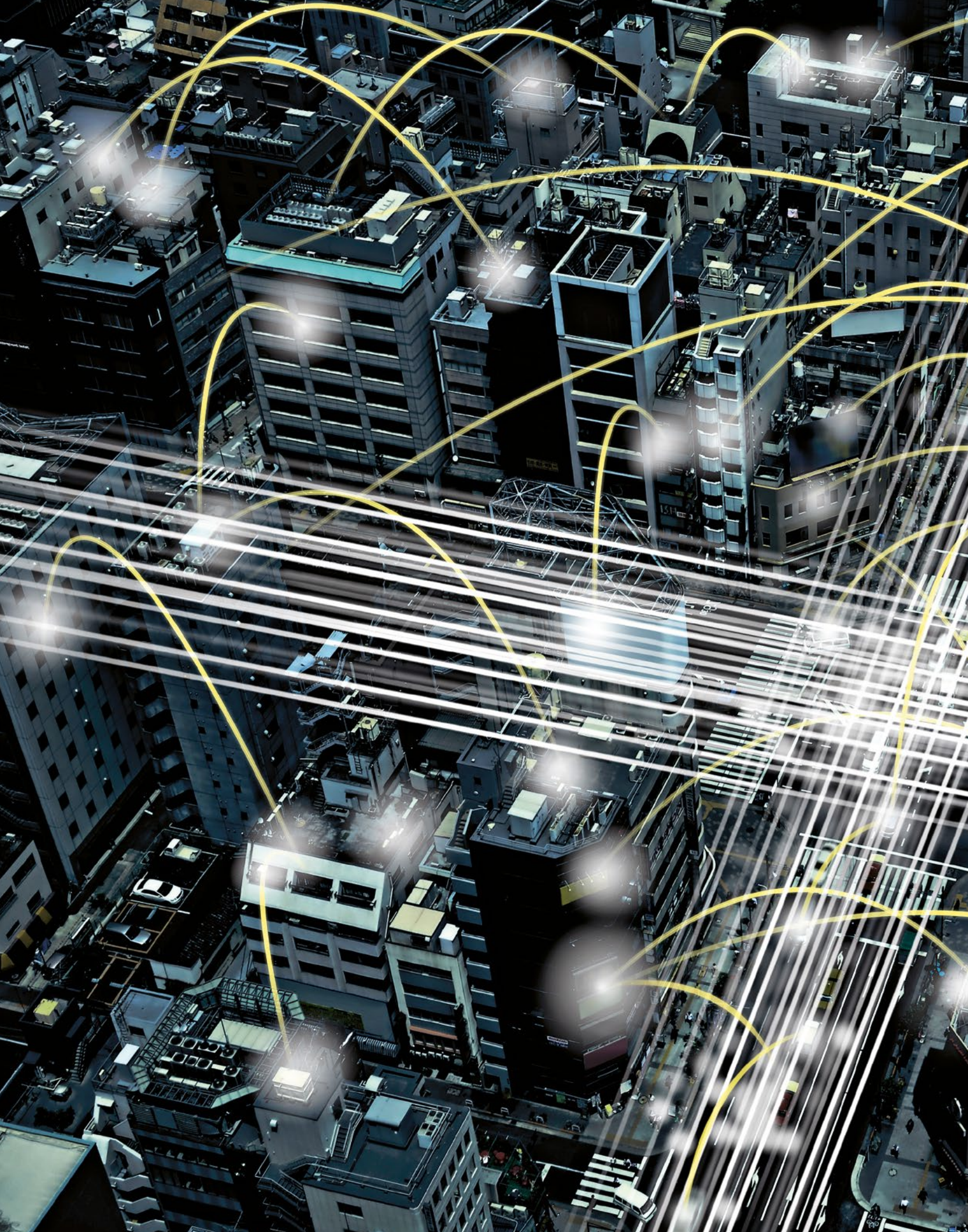
44 Numerische Modelle für einfachere Applikation

Präzise Kalibrierung von Motorsteuerungsfunktionen

03 Editorial

06 News

49 Impressum



PORSCHE BESCHLEUNIGT DIGITALISIERUNG

_____ Porsche geht die nächsten Schritte in Richtung digitale Transformation. Mit mehreren Veränderungen richtet sich das Unternehmen auf die digitalen Herausforderungen der Zukunft aus. Neben der Gründung der Porsche Digital GmbH mit Sitz in Ludwigsburg und dem Start des Digital Labs in Berlin spielt auch die Anfang des Jahres gegründete Gesellschaft Porsche Engineering Romania in Cluj-Napoca (Klausenburg) eine entscheidende Rolle in der Entwicklung innovativer Lösungen für die Mobilität von morgen – und steht damit voll und ganz im Zeichen der neu entwickelten Porsche Engineering Strategie 2025.

Die Porsche Digital GmbH fungiert als Kompetenzzentrum, in dem digitale Kundenerfahrungen, Produkte, Geschäftsfelder und -prozesse identifiziert und weiterentwickelt werden. Zu den Aufgaben der Digital GmbH gehört außerdem das weltweite Scouting: Sie identifiziert und bewertet neue Trends und sichert auf diese Weise den Zugriff auf relevante Technologien. Neben eigenem Innovationspotenzial setzt die Digital GmbH dabei auch auf Partnerschaften weltweit. Dies gilt insbesondere für die Gebiete Konnektivität, Smart Mobility sowie autonomes Fahren. Laut Thilo Koslowski, Geschäftsführer der Porsche Digital GmbH, schafft dieser Verbund „Porsche-typische digitale Kundenerlebnisse, die faszinieren und intelligent sind – sowohl innerhalb als auch außerhalb des Fahrzeugs“.

Auch das jüngst eröffnete Porsche Digital Lab im Berliner Stadtteil Friedrichshain überträgt die tief greifenden Veränderungen der digitalen Transformation in die Automobilentwicklung. Im Digital Lab beschäftigen sich die Entwickler mit der Frage, wie Innovationen aus den Bereichen Big Data &

Machine Learning, Micro Services & Cloud Technologies sowie Industry 4.0 & Internet of Things in die Praxis von Porsche übertragen werden können. Die Aufgaben reichen von Trendscouting über die Ideenfindung bis hin zum Bau von IT-Prototypen und -Komponenten.

In der rumänischen Universitätsstadt Cluj-Napoca, einer der innovativsten Regionen für Softwareentwicklung in Europa, setzt Porsche Engineering Ideen und Konzepte der digitalen Zukunft in konkrete Projekte für die Automobilindustrie um. Das Leistungsspektrum der Tochtergesellschaft in Cluj-Napoca reicht von fahrzeugbezogener Software- und Funktionsentwicklung bis hin zu weiteren Fahrzeugentwicklungsthemen wie der Simulation und Konstruktion. „Cluj wird dazu beitragen, dass wir die Digitalisierung des Fahrzeugs weiter vorantreiben“, erklärt Marius Mihailovici, Standortleiter von Porsche Engineering Romania.

Damit gliedert sich der jüngste Standort von Porsche Engineering in die neu entwickelte Strategie 2025 des Ingenieurdienstleisters ein. „Porsche Engineering steht für erstklassige Kompetenzen in drei zentralen Feldern der Automobilentwicklung von heute und morgen“, erläutert Malte Radmann, Vorsitzender der Geschäftsführung von Porsche Engineering. „Neben der klassischen Derivat- und Systementwicklung, für die wir seit Ferdinand Porsches Gründung des Konstruktionsbüros stehen, bilden die Bereiche Testing und Digitalisierung die beiden weiteren Säulen unseres Leistungsspektrums.“ Durch die Kombination aus traditionellen und innovativen Engineering-Kompetenzen möchte der internationale Ingenieurdienstleister auch in Zukunft die Bedarfe der weltweiten Kunden erfüllen. ■

NEUE KABINENGENERATION

ENTWICKLUNG FÜR SCANIA VORGESTELLT



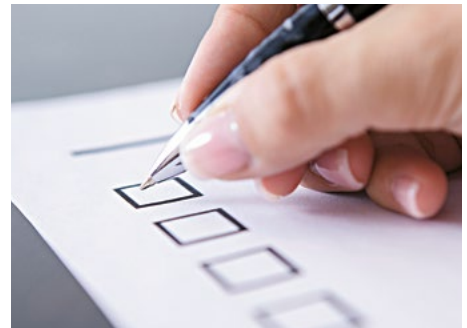
ERÖFFNUNGSFEIER

STANDORT CLUJ-NAPOCA



LESERBEFRAGUNG

OPTIMIERUNG KUNDENMAGAZIN



___ Im August 2016 präsentierte der Lastwagenhersteller Scania erstmalig seine Lkw-Baureihe mit neuen Fahrerhäusern, die in Zusammenarbeit mit Porsche Engineering entwickelt wurden. Sie basieren auf einem modularen System der Fahrerhausmodelle, von denen zuerst die R-Baureihe sowie die komplett neue S-Baureihe eingeführt werden. Mit der S-Baureihe stellt Scania das Spitzenmodell unter den Fahrerhäusern mit flachem Boden vor. Das neue und das bisherige Fahrerhausprogramm weisen keine gemeinsamen Teile mehr auf. Jedoch wurden alle positiven Fahrerhauseigenschaften, die Scania auszeichnen, auf die neuen Baureihen übertragen. Die Entwickler berücksichtigten hierbei die heutigen und zukünftigen Ansprüche von Kunden und Gesetzgebern gleichermaßen. ■

___ Der neue Entwicklungsstandort von Porsche Engineering in Cluj-Napoca (Klausenburg), Rumänien, wurde Mitte Juli offiziell eröffnet. Bei einer Pressekonferenz gab Porsche Engineering seine Wachstumspläne bekannt und stellte Marius Mihailovici als neuen Standortleiter vor. Neben Mitarbeitern und Partnern von Porsche Engineering nahmen an der offiziellen Eröffnungszeremonie auch Judith Urban, deutsche Konsulin in Sibiu (Hermannstadt), sowie Emil Boc, Bürgermeister von Cluj-Napoca, und weitere Vertreter aus Forschung, Wirtschaft und Politik teil. Am Tag der Eröffnung wurde außerdem gemeinsam mit Universitätsvertretern der Vertrag zum Masterstudiengang „Automotive Engineering“ an der Technischen Universität Cluj-Napoca unterzeichnet. Auch mit der dort ansässigen Babeş-Bolyai-Universität führt das Unternehmen Gespräche zur Kooperation. ■

___ Mit der letzten Ausgabe des *Porsche Engineering Magazins* (1/2016) wurde eine Leserbefragung durchgeführt, um das Magazin – sowohl hinsichtlich der Themenauswahl als auch in Bezug auf Design und Gestaltung – zukünftig noch besser auf die Wünsche und Bedürfnisse der Leser ausrichten zu können. Porsche Engineering bedankt sich herzlich bei allen Teilnehmerinnen und Teilnehmern für das hilfreiche Feedback. Pro ausgefülltem Fragebogen spendet das Unternehmen fünf Euro an die LWV Eingliederungshilfe Markgröningen, eine Behindertenwerkstätte im Großraum Stuttgart, mit der das Unternehmen auch in der Vergangenheit bereits kooperierte. ■

VERNETZTES FAHREN

FORSCHUNGSINITIATIVE IN SHANGHAI



— Porsche Engineering Shanghai erweitert seine Aktivitäten zum vernetzten Fahren: Im Juli 2016 wurde die chinesische Niederlassung Mitglied des United Innovation Centre for Intelligent and Connected Vehicle Industry Technology (UIC) – ein Pilotbereich für Fahrzeugvernetzung und autonomes Fahren. Das UIC wurde im Juli 2015 durch die Shanghai International Automobile City ins Leben gerufen und durch das Ministerium für Industrie und Informationstechnologie (MIIT) ratifiziert. Das UIC kooperiert mit internationalen Unternehmen, Forschungsinstituten und Hochschulen. Porsche Engineering unterstützt die Entwicklung dieser Testzone und nimmt am Austausch zu den jüngsten Entwicklungen in der chinesischen Autoindustrie, der Gesetzgebung sowie allgemeinen Forschungsergebnissen teil. Die Automobile City wird sich in Zukunft auf eine Gesamtgröße von mehr als 100 Quadratkilometern erstrecken. ■

OPTIMIERTES DIAGNOSETOOL

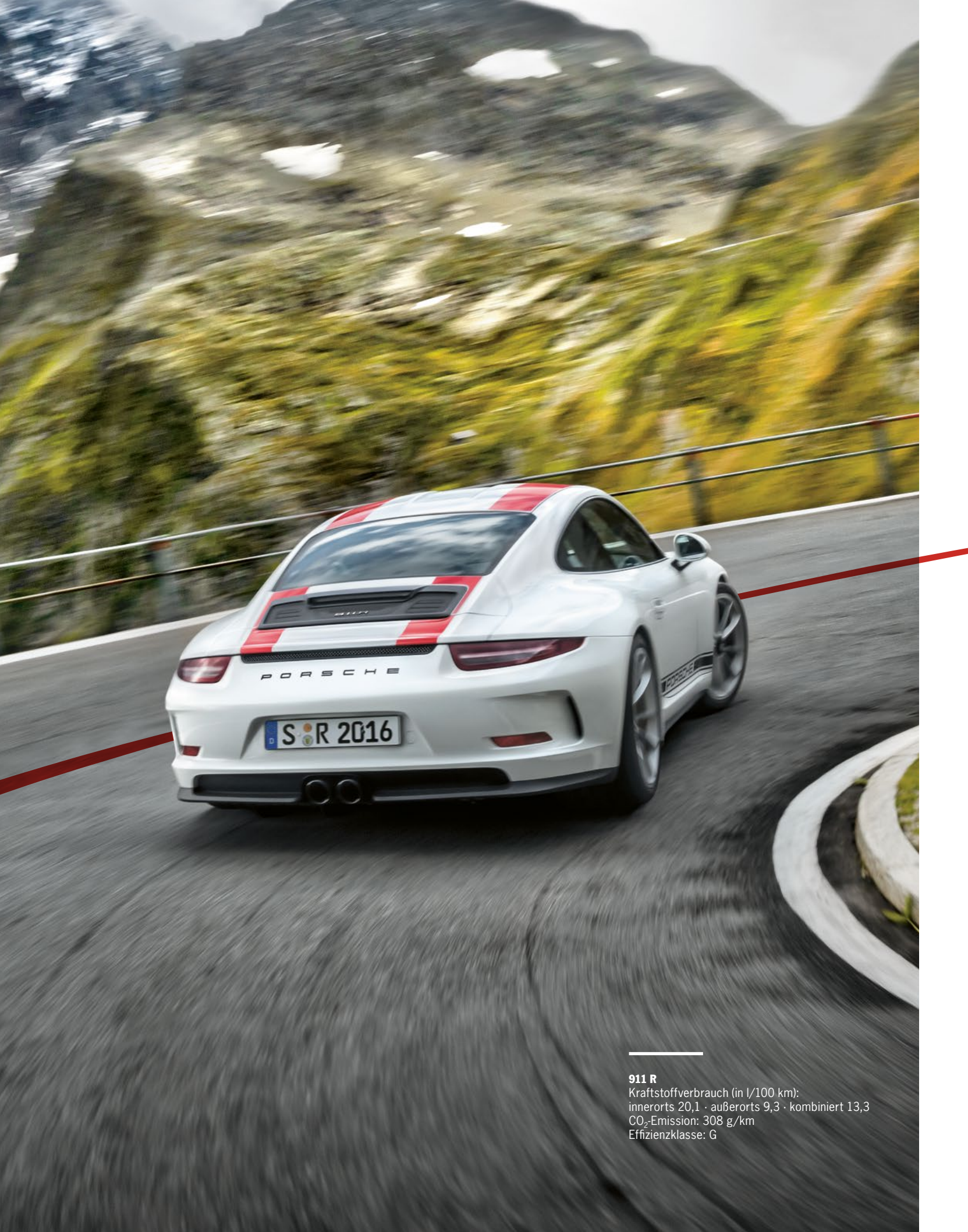
BAUTEILTEMPERATURMESSUNG



— Das System zum berührungslosen Messen von Bauteiltemperaturen (siehe *Porsche Engineering Magazin* 1/2015) wurde weiterentwickelt und optimiert: Der Durchmesser des existierenden Werkzeugs wurde auf 26 % seiner ursprünglichen Größe reduziert, wodurch sich durch frei gestaltbare Optiken auch der Messabstand auf 30 % verringert sowie der Messfleck auf 60 % seines Ausgangswertes reduziert. Die Nähe zum Messobjekt bewirkt eine Steigerung der Signalintensität sowie der Zielgenauigkeit. Kombiniert mit dem kleineren Messfleck begünstigt dies das Feststellen dynamischer Effekte und steigert die Qualität der Messung. ■

Dynamisch

—— Performanceorientierte Fahrwerkauslegung zählt zum Markenkern von Porsche. Die Kombination von optimaler Dynamik und Komfort ist ein klassisches Merkmal der Porsche-Sportwagen. Erfahren Sie, wie Porsche heute Fahrwerke für höchste Ansprüche entwickelt, welche neuen Funktionalitäten die digitale Evolution ermöglicht, wie die Alltagstauglichkeit des Porsche 911 weiter verbessert wird und wie automatisierte Tests und simulierte Erprobungen die Entwicklungseffizienz steigern können.



911 R
Kraftstoffverbrauch (in l/100 km):
innerorts 20,1 · außerorts 9,3 · kombiniert 13,3
CO₂-Emission: 308 g/km
Effizienzklasse: G

Optimale Performance

Wie Porsche performanceorientierte Fahrwerke auslegt

Ein Porsche steht in jedem Marktsegment für klassenbeste Fahrdynamik in Verbindung mit einer hohen Spreizung zwischen Fahrdynamik und Komfort. Jede Baureihe, jedes Modell ist in seinem Konzept darauf ausgelegt und optimiert. Denn nur aus einem exakt ausgewogenen Zusammenspiel von (Gesamt-)Konzept, Antrieb und Fahrwerk kann Fahrdynamik entstehen. Diese performanceorientierte Auslegung zählt zum Markenkern von Porsche und wird im Zuge der digitalen Evolution auch in Zukunft mit neuen Funktionalitäten für ein einzigartiges Fahrverhalten sorgen.

Von Peter Mevißen und Norbert Schote; Fotos: Victor Jon Goico

Gesamtfahrzeugkonzept

- > konsequente Berücksichtigung der Fahrdynamikanforderungen im Gesamtfahrzeugkonzept

Fahrwerkmechanik

- > Hochleistungsreifen
- > Performancefestsattelbremsen
- > Präzisionsachsen

Mechatronische Systeme

- > weitere Erhöhung des Performancepotenzials
- > Spreizung zwischen Fahrdynamik und Komfort

Die drei Säulen des performanceorientierten Gesamtkonzeptes

Das performanceorientierte Gesamtkonzept beruht auf drei Säulen: Die erste besteht aus *grundsätzlichen Konzeptmerkmalen* wie beispielsweise dem Radstand, der Spurweite und dem Gewicht. Die *Fahrwerkmechanik* mit Achskonzept, Bremsen und Bereifung bildet die zweite Säule. Der dritte Pfeiler setzt sich aus den *mechatronischen Fahrwerksystemen* wie zum Beispiel elektromechanischer Lenkung (EPS, electric power steering), aktiver Wankstabilisierung (Porsche Dynamic Chassis Control) und semiaktiver Motorlagerung zusammen. Ziel der Fahrwerkentwicklung für alle Porsche-Modellreihen ist die klassenbeste Fahrdynamik verbunden mit einer

hohen Spreizung bezüglich des Komforts. Genauer aufgeschlüsselt beinhalten die drei Säulen des Gesamtkonzeptes folgende Merkmale:

Grundlage für die performanceorientierte Auslegung der Fahreigenschaften ist zunächst das *Gesamtfahrzeugkonzept*. Ein langer Radstand sorgt für guten Geradeauslauf und große Spurweiten, und ein niedriger Schwerpunkt für geringe Radlastschwankungen in Kurven. Für den Fahrer bedeutet das: hohe Querbeschleunigung, geringe Lastwechselreaktionen und wenig Wankneigung. Eine ausgewogene Achslastverteilung in Verbin-





dung mit hecklastiger Antriebsmomentenverteilung resultiert in optimaler Traktion und neutralem Eigenlenkverhalten.

Bei der *Fahrwerkmechanik* steht die Festlegung der Dimensionen von Rädern und Reifen am Anfang. In allen Baureihen setzt Porsche auf Mischbereifungen (breitere Hinter- als Vorderreifen) und im Supersportbereich Mischbezollungsdimensionen (Räder der Hinterachse verfügen zusätzlich über einen größeren Durchmesser). Für beste Bremsperformance, hohe Standfestigkeit und ein gutes Bremsgefühl kommen in allen Porsche-Modellen Festsattelbremsen zum Einsatz. Die Achs-

konzepte mit ständig weiterentwickelten kinematischen Eigenschaften gewährleisten in allen Fahrzuständen die richtige Stellung der Räder zur Fahrbahn und damit die optimale Kraftübertragung der Reifen.

Mechatronische Systeme gewinnen bei Fahrwerkskonzepten zunehmend an Bedeutung für Fahreigenschaften und Komfortspritzung. Porsche entwickelt dabei die Kernelemente selbst. Beispielsweise wurde der Regler für die elektromechanische Lenkung mit eigenem Know-how auf höchste Rückmeldequalität bei gutem Lenkkomfort ausgelegt. >

Zur weiteren Steigerung der Fahrdynamik (Agilität und Stabilität) entstand ergänzend für den 911 und den neuen Porsche Panamera eine Hinterachslenkung.

Weitere, miteinander vernetzte Regelsysteme mit fahrdynamischem Einfluss sind bei Porsche bereits seit Jahren im Einsatz, teilweise serienmäßig: Das abschaltbare Porsche Stability Management (PSM) wird oft mit dem Porsche Torque Vectoring (PTV) zur Optimierung von Stabilität und Agilität kombiniert. Das Porsche Active Suspension Management (PASM) regelt die Dämpfungskraft an den Rädern und die aktive Motorlagerung beeinflusst gezielt das Schwingungsverhalten des Antriebsstrangs. Zusammen mit den geregelten Luftfedern kann die Spreizung zwischen Komfort und Sportlichkeit maßgeblich gesteigert werden. Und bei den Allradmodellen sorgt das Porsche Traction Management (PTM) zur Steigerung der Performance für die situative Momentenverteilung zwischen Vorder- und Hinterachse.

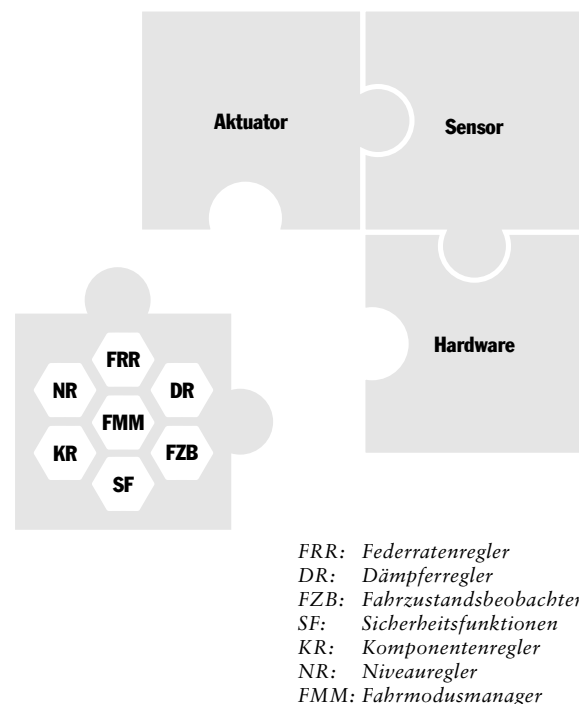
Fahrwerksysteme mit maßgeschneiderten Funktionalitäten

Die spezifische Entwicklung der Funktionsalgorithmen ermöglicht eine optimale Ausnutzung der Systempotenziale und die Umsetzung von definierten Umfängen. Das Ergebnis sind maßgeschneiderte Funktionalitäten. Integraler Bestandteil der Funktionsentwicklung für mechatronische Fahrwerksysteme bei Porsche ist deren fahrphysikalische Modellierung. Dadurch ist eine einfache Abstimmung der Funktionen mit wenigen physikalischen Parametern möglich. Außerdem lassen sie sich einfach in unterschiedliche Derivate sowie in andere Baureihen übertragen.

Die modellbasierte Funktionsentwicklung und deren einfache Übertragbarkeit ermöglichen eine kontinuierliche Weiterentwicklung und Optimierung der Algorithmen. Applikationskonzepte können baureihenübergreifend vereinheitlicht werden, und trotzdem ist es möglich, maßgeschneiderte Lösungen für die Systeme zu schaffen. Dadurch kann bei gleicher Systemhardware ein gesteigerter Kundennutzen generiert werden.

Debüt im neuen Porsche Panamera: die elektronische Fahrwerkplattform

Ein Beispiel für die Eigenentwicklung von Fahrwerkfunktionen sind die Fahrwerkregelsysteme der elektronischen Fahrwerkplattform (EFP) im neuen Panamera. Das EFP-Steuergerät integriert eine Vielzahl von bisherigen Steuergeräten (siehe Abbildung oben).



Architektur des EFP-Steuergeräts

Das Hauptaugenmerk der Ingenieure bei der Entwicklung der Konzepte und Funktionen lag auf der maximalen Spreizung zwischen Performance und Fahrkomfort. Sie soll Porsche – wie schon bisher – das Attribut Best in Class sichern. Die Grundlage zur Entschärfung der Zielkonflikte legt das über das Marktübliche hinausgehende Sensorik- und Aktuatorik-konzept. Es ermöglicht, zusammen mit den geregelten Fahrwerksystemen optimal auf jede Fahr- und Umgebungssituation einzugehen.

Für die große Zahl notwendiger Funktionen gab es in der Vergangenheit eine Vielzahl von Steuergeräten, die mit der Einführung der elektronischen Fahrwerkplattform im neuen Panamera erstmalig in einem einzigen Steuergerät gebündelt und zentralisiert wurden. Die Zusammenfassung aller Feder- und Dämpferregler auf einer Plattform vermeidet Redundanzen und verringert die Anzahl der Schnittstellen. Dies bringt nicht nur Vorteile bei Buslast und Signallaufzeiten, sondern ermöglicht auch eine hochagile Entwicklung.

Porsche hat den noch nie da gewesenen Komplexitätsgrad in der Entwicklung und Integration dieses neuen Mechatronikverbundes frühzeitig erkannt. Auf Basis einer eigens dafür durchgeführten Prozessanalyse definierte und implementierte die Entwicklungsabteilung ein neues Modell zur interdisziplinären Steuerung des Projektes.

Das EFP-Projektmodell baut im Wesentlichen auf einer klassischen Matrixorganisation auf. Jede Softwarekomponente wird dabei einem spezifischen Projektbereich zugeordnet, der für die Entwicklung der Funktion verantwortlich ist. Die übergreifende Integrationsabteilung stellt den Projektleiter, den wiederum Teilprojektleiter unterstützen. Für verschiedene Themen, beispielsweise die Überwachung des Reifegradstatus oder die Erprobungs- und Qualifikationsplanung, wurden spezialisierte Gremien aufgebaut. Das Konzept hat sich bewährt: Die reibungslose und terminorientierte Projektsteuerung wird gewährleistet, da die operativ tätigen Mitarbeiter aus verschiedenen Abteilungen mit unterschiedlichen disziplinarischen Vorgesetzten kommen.

PDCC Sport: die elektromechanische Wankstabilisierung im Porsche Panamera

Für die zweite Generation des Porsche Panamera wurde auch die aktive Wankstabilisierung neu entwickelt. Das elektromechanische System PDCC Sport ersetzt die aus der ersten Generation bekannte hydraulische Variante. Für den Fahrer hat das neue System mehrere Vorteile, wie beispielsweise die Steigerung der subjektiven Solidität und die bessere Beeinflussung des Eigenlenkverhaltens durch einen sehr guten Kraftaufbau.

Elektromechanische Systeme sind auch aufgrund der immer weiter ansteigenden Elektrifizierung im Bereich des Antriebs sinnvoll. Dank der Verfügbarkeit und den funktionalen Vorteilen der 48-Volt-Technologie ist die Systemversorgung in ebendieser Spannungshöhe gewährleistet. Eine höhere Anzahl elektromechanischer Komponenten ist somit möglich. Ein positiver Aspekt dieser Systeme ist der im Vergleich zum hydraulischen System deutlich reduzierte Packageaufwand. Die notwendigen Komponenten lassen sich wegen ihrer geringen Anzahl leichter standardisieren und in mehrere Fahrzeugplattformen integrieren. Das System wird in gleicher Form

später auch in weiteren Fahrzeugen des VW-Konzerns nach dem Baukastenprinzip eingesetzt.

Die aktive Wankstabilisierung setzt sich aus zwei Teilsystemen zusammen, die durch einen Kabelstrang miteinander verbunden sind: der eigentliche *Aktuator* zur Einleitung von Kräften in die Fahrzeugstruktur und das *Steuergerät* mit einer Energieversorgung von 48 Volt (siehe Abbildung unten).

Das *Aktuatorkonzept* besteht pro Achse aus einem Grundaktuator mit zwei Stabilisatorhälften. Im Grundaktuator treibt ein bürstenloser Gleichstrommotor (BLDC-Motor) ein dreistufiges Planetengetriebe an. Über dessen Untersetzung tordiert der Aktuator die beiden Stabilisatorarme gegeneinander mit einem maximalen Moment von 1.200 Nm. Das Planetengetriebe ist auf einen hohen Wirkungsgrad und geringe Geräuschemissionen bei dynamischem Betrieb optimiert.

Das zweite wesentliche Teilsystem ist das *Steuergerät* mit der 48-Volt-Leistungsversorgung. Die Integration aller Bauteile auf engstem Bauraum und die Sicherstellung von Zielwerten der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) bilden dabei eine Herausforderung. Die Länge der Verbindung zwischen Steuergerät und Aktuator kann bis zu drei Meter betragen. Die Watfähigkeit (Dichtheit bei Wasserdurchfahrt) des Steuergeräts ermöglicht dabei eine große Flexibilität bei der Unterbringung im Fahrzeugpackage. Die Kommunikation des Steuergeräts mit dem Fahrzeug übernimmt eine CAN-Verbindung. Die Software auf dem Steuergerät – basierend auf AUTOSAR – wird vom Netzwerk des Fahrzeugs mit allen notwendigen Fahrzustandssignalen versorgt.

Eine Herausforderung bei der Entwicklung des Systems stellte die Optimierung der Fahrkomfortfunktionen dar. Zum Erreichen der gesteckten Ziele war eine hochkomplexe Regelung vonnöten, die per Simulation, Prüfstandtests und umfangreichen Erprobungen im Fahrbetrieb praktisch entwickelt wurde.



Die zwei wesentlichen Komponenten der aktiven Wankstabilisierung: Aktuator und Steuergerät

Innovativer Lenkungsregler für Sportwagen

Der Regler für die elektromechanische Lenkung ist für den Fahrer die wichtigste Informationsquelle über den Fahrzustand: Je direkter und eindeutiger die Rückmeldung, desto dynamischer und präziser der Sportwagen. Porsche hat deshalb seine eigene Lenksystemsoftware entwickelt.

Ziel des innovativen Regelkonzeptes ist, einerseits die konzeptionell reduzierte Fahrbahnrückmeldung von elektromechanischen Lenksystemen unabhängig vom Lenkungszulieferer auf das hohe Niveau hydraulischer Lenksysteme >



Basis für alle Porsche-Fahrwerke: eine funktional optimale, stetig weiterentwickelte Hardware von Achssystem, Reifen und Bremsen.

den Fahrer transparent zu machen und Bereiche mit störenden Anregungen in der Übertragung zu bedämpfen. Der Effekt: Der Lenkkomfort lässt sich EPS-typisch steigern, ohne Kompromisse in der fahrdynamischen Rückmeldung und Natürlichkeit eingehen zu müssen.

Auch die Rückstellung des Lenksystems basiert nicht mehr auf synthetisch applizierten Lenkfunktionen, sondern entsteht aus den tatsächlich anliegenden Rückstellkräften am Reifen (siehe Abbildung auf rechter Seite). Speziell bei Grenzmanövern wie Unter- oder Übersteuern ist die Funktionalität der Unterstützungskraftregelung in hohem Maße erfahrbar. Neben der rückmeldungssteigernden Regelung trägt auch eine ganze Reihe zusätzlich integrierter Funktionen, wie zum Beispiel Niederreibwertindikation, Hands-off-Erkennung oder situative Stabilisierung, zu einer situationsgerechten und sicheren Funktionalität des Lenksystems bei.

Der Fahrer genießt mit diesen neuen Lenkungenfunktionen das Porsche-typische Lenkgefühl von Solidität und unmittelbarer

anzuheben. Andererseits sollen gleichzeitig die zahlreichen Vorteile der elektromechanischen Lenkgetriebe in vollem Umfang erhalten bleiben. Zum Kern der Software zählen neben der gesamten Regelungsstruktur auch zahlreiche Funktionsmodule, die in direkter Anlehnung an die Porsche-spezifischen fahrdynamischen Anforderungen entwickelt und in die Gesamtarchitektur des Steuergerätes integriert werden. Somit entsteht letztendlich eine firmeneigene Lenkfunktionsbibliothek, die unabhängig von Baureihe und Lenksystemlieferant eingesetzt werden kann.

Das Konzept der Unterstützungskraftregelung (UKR) basiert auf der Onlineberechnung der auf die Lenkung wirkenden Teilkräfte. Diese setzen sich aus Fahrerlenkkraft, Reibungs- und Trägheitskräften, der tatsächlichen Unterstützungskraft des Servomotors sowie der anliegenden Kraft aus dem Reifen-Fahrbahn-Kontakt zusammen. Die Summenkräfte werden über einen Beobachteransatz mit lediglich minimaler Abweichung im Steuergerät des Lenksystems berechnet und den Softwarefunktionsmodulen zur Verfügung gestellt. Die Berechnung erfolgt damit ausschließlich über bereits vorhandene Messsignale ohne zusätzliche Sensorik.

Die Soll-Unterstützungskraft an der Zahnstange wird anschließend von einem Regler, der in der Simulation und am Prüfstand abgestimmt wurde, definiert. Er arbeitet in Abhängigkeit der Frequenz der externen Kraftanregung. Somit ist es möglich, Frequenzbereiche mit Nutzinformationsgehalt für

Die Porsche Fahrwerkentwicklung – Trends und neue Technologien



Intelligentes Fahrzeug

- > Betriebs- und Lastdaten
- > prädiktive/individuelle Wartung
- > Feldüberwachung – Frühwarnung
- > Software-Updates



Innovative Produkte

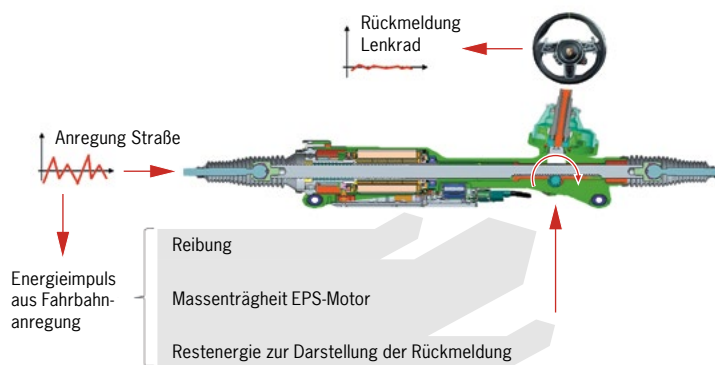
- > neue Fahrwerksysteme/Sensorik
- > intelligente Reifen
- > Vernetzung der Systeme
- > adaptives Fahrwerk – interne/externe Daten



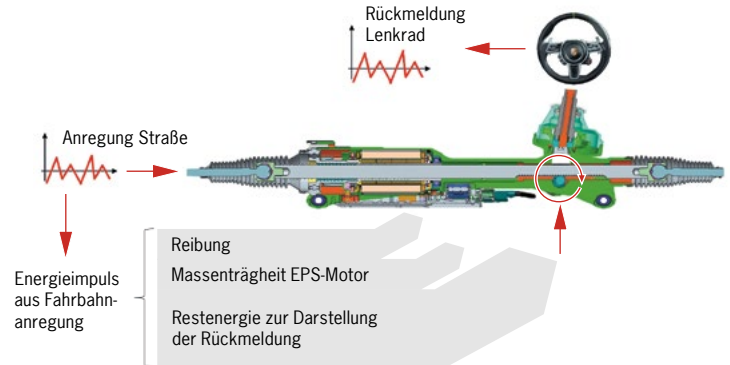
Produktentwicklung

- > Digitalisierung der Entwicklung
- > OTA – Support für Prototypen-Fahrzeuge
- > dokumentierte Flottenabsicherung
- > Off-Board-Analysen

Rückmeldungspfad einer EPS mit herkömmlicher Reglerphilosophie



Rückmeldungspfad einer EPS mit Unterstützungskraftregelung (UKR)



Rückmeldungsoptimierung durch Massenträgheitskompensation

Informationsrückmeldung. Die wichtigsten Aspekte stellen die verbesserte Fahrzeugführung und Zielgenauigkeit im fahrdynamischen Grenzbereich dar.

Fahrwerke der Zukunft: digitale Evolution

Die Fortschritte in Digitalisierung, Sensorik und Aktuatorik werden die Fahrwerkentwicklung in Zukunft entscheidend prägen. Der zunehmende Einsatz dieser Bereiche hilft dabei, Kompromisse und Zielkonflikte immer weiter aufzulösen. Die Spreizung zwischen Sportlichkeit und Komfort wird noch breiter und wird dabei von neuen Funktionen ergänzt.

Digitalisierung und Konnektivität, E-Mobilität und autonomes Fahren sind im Automobilbau die bestimmenden Technologietrends von heute und morgen. Die damit verbundene rapide wachsende Vernetzung, auch weit über das Fahrzeug hinaus, wird einen erheblichen Einfluss auf die Fahrwerksysteme im Einzelnen, aber ebenso auf ihr Zusammenspiel im Fahrzeug und die Interaktion der Systeme mit der Außenwelt haben. Innerhalb des Fahrzeugs gilt eine Intensivierung des gegenseitigen Informationsaustauschs der Systeme als sicher. Diese wachsende Vernetzung erweitert die Möglichkeiten, das Fahrdynamikpotenzial und den Komfort weiter zu steigern.

In absehbarer Zeit kommt die Kommunikation der Fahrzeuge untereinander hinzu. Denkbar ist etwa eine von den Fahr-

zeugen und der Umwelt gespeiste zentrale Wissens- und Datenbank, die Fahrer und Fahrzeug mit Informationen versorgt. Damit können Ingenieure die Fahrzeuge und Fahrwerke noch sicherer, zuverlässiger und kundenorientierter gestalten. Wesentlicher Bestandteil der digitalen Möglichkeiten zur Fahrwerkregelung ist dabei sicherlich auch ein Over-the-Air-Update (OTA-Update).

Mit dieser Funktionserweiterung ist eine stark zunehmende Komplexität der Systeme verbunden. Das bedeutet gleichzeitig, dass die Entwicklungsprozesse in naher Zukunft vor umfangreichen Anpassungen stehen. Im Mittelpunkt der Neuorientierung wird die Verkürzung der Entwicklungszeiten liegen, um mit den rasanten Entwicklungen des Digitalmarktes Schritt halten zu können. Ein weiterer Schwerpunkt liegt aber auch auf der funktionalen Absicherung der Systeme, da Fehler in Hard- und Software eines Fahrwerks sicher ausgeschlossen werden müssen.

Basis für die Fahrwerke bei Porsche wird indes immer eine funktional optimale, stetig weiterentwickelte Hardware von Achssystem, Reifen und Bremsen bilden. Sie ist die Grundlage der Porsche-DNA, die sich aus klassenbesten Fahrdynamik und Bremsperformance, Rundstreckentauglichkeit und Komfort sowie vorbildlicher Effizienz zusammensetzt. Auch unabhängig von der Antriebstopologie ist damit gewährleistet, dass das Fahrverhalten das zentrale Element des Porsche-Markenkerns bleibt. ■

Intelligente Lösung

Entwicklung eines Vorderachs-liftsystems für den Porsche 911

____ Porsche bietet erstmals für die neue Straßensportwagengeneration des 911 ein Liftsystem an der Vorderachse an. Diese Option trägt zur weiteren Verbesserung der Alltagstauglichkeit des Sportwagenklassikers bei.

Von Olaf Ahrens und Benjamin Reddingius



Das optionale Vorderachsliftsystem steigert den Alltagsnutzen des Fahrzeuges für den Kunden beträchtlich. Insbesondere bei steilen Tiefgaragenzufahrten zahlt sich diese Option aus, wenn der Böschungswinkel des Fahrzeuges von 9,7° auf 12,7° innerhalb von vier Sekunden vergrößert werden kann. Damit ist die Gefahr von Beschädigungen durch das Aufsetzen des Fahrzeuges weitestgehend ausgeschlossen. Diese Steigerung resultiert aus der Anhebung des Vorderwagens um rund 40 mm am Bugteil, entsprechend 34 mm am Federbein.

Weiterhin erleichtert das System auch das Überfahren von Tempeschwellen, da es bis zu einer Fahrgeschwindigkeit von 35 km/h verfügbar ist.

Der Schlüsselimpuls für die Entwicklung des Vorderachsliftsystems kam von Kundenseite. Porsche-Kunden zeigten reges Interesse an einem Liftsystem, das direkt in die Neufahrzeugbestellung aufgenommen werden kann, ohne eine Einschränkung bezüglich sonstiger Ausstattungswünsche in Kauf nehmen zu müssen. Auch sollte das System die Alltagstauglichkeit des Fahrzeuges steigern, ohne jedoch zulasten anderer Eigenschaften wie beispielsweise des Kofferraumvolumens zu gehen. Ein ebenfalls wichtiges Kriterium war die Systemeinbindung in das fahrzeugseitige Bedien- und Anzeigekonzept.

Eine der Herausforderungen bestand darin, das zu entwickelnde System in jedes Derivat der aktuellen 911-Baureihe – mit Ausnahme der GT-Varianten – zu integrieren. Da sich die Federbeine zwischen Coupé, Cabrio, Targa und Turbo sowie zwischen Zwei- und Vierradantrieb unterscheiden, erhöhte sich die Anzahl der Varianten durch das Vorderachsliftsystem auf die doppelte Anzahl.

Das Konzept: ein hydraulischer Aktuator an jedem vorderen Federbein

Die Ingenieure konzipierten ein Vorderachsliftsystem, das aus zwei Aktuatoren an den vorderen Federbeinen besteht. Dabei handelt es sich um hydraulisch wirkende Zylinder mit einem Ringspalt als Wirkfläche. Aufgrund der sehr knappen Packageverhältnisse im Bereich der Vorderachse fiel die Entscheidung zugunsten einer hydraulischen Lösung.

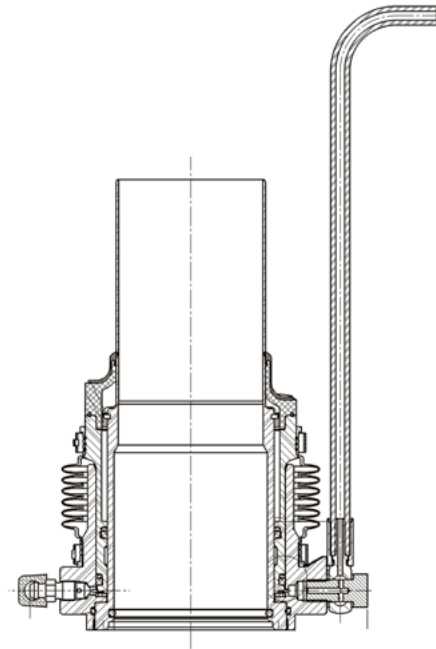
Die Verbindung zwischen Aktuator und Schraubenfeder, die Federunterlage und das dazugehörige Distanzstück bestehen aus einem Kunststoffbauteil mit integrierter Federauflage aus Gummi. Die Gummiauflage verfügt zusätzlich über eine angespritzte Dichtlippe, die das Eindringen von Feuchtigkeit in das System verhindert. Diese Dichtlippe läuft auf einem Zylinder, der über das Behälterrohr des Vorderachsschwingungs-

dämpfers geschoben wird. An diesen Zylinder werden spezielle Oberflächenanforderungen bezüglich der Dichtwirkung zwischen Lippe und Zylinder sowie der Akustik gestellt.

Die Verbindung zwischen den hydraulischen Aktuatoren (siehe Abbildung oben) und den Festleitungen im Vorderwagen übernehmen flexible Schläuche mit Schnelltrennkupplungen (siehe Abbildung auf Seite 20 oben links). Diese speziellen Kupplungen sind mit einem eigens entwickelten Halter an der Karosserie befestigt. Beide Leitungsenden können unter vollem Systemdruck gesteckt werden, ohne dass Luft in die Hydraulik eindringen kann. Die Schnelltrennkupplungen stammen aus dem Motorsport, wo sie im Bereich der Bremsen eingesetzt werden. ➤

911 TARGA
Kraftstoffverbrauch (kombiniert): 9,0 – 7,9 l/100 km
CO₂-Emission (kombiniert): 208 – 182 g/km
Effizienzklasse: F-D

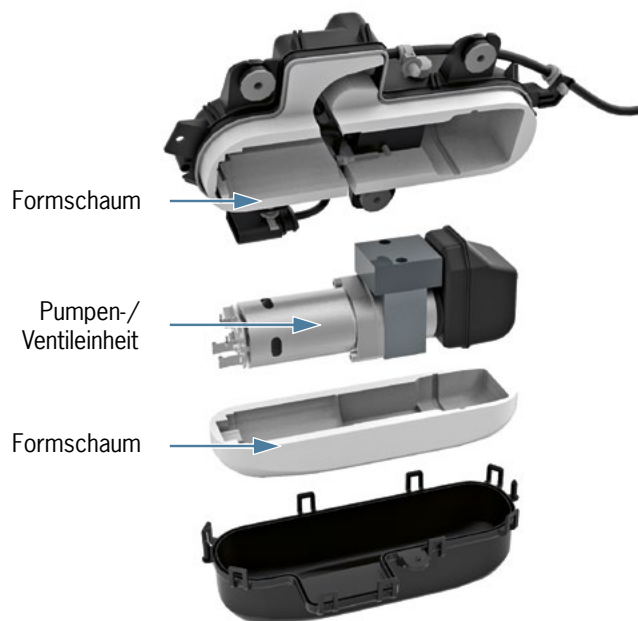
911 TURBO
Kraftstoffverbrauch (kombiniert): 9,3 – 9,1 l/100 km
CO₂-Emission (kombiniert): 216 – 212 g/km
Effizienzklasse: F



Hydraulischer Aktuator



Schnelltrennkupplung mit Halterung



Pumpengehäuse

Vorbefüllte Anlage für geringstmöglichen Montageaufwand

Der aus der zuvor erläuterten Lösung resultierende Vorteil besteht darin, dass der Aktuator komplett vorbefüllt an den Montageort des Fahrzeuges angeliefert werden kann. Nach dem Stecken der Kupplung sorgt die Federvorspannung dafür, dass die Hydraulikflüssigkeit von den Aktuatoren über die Kupplung in die Leitungen zur Pumpe und zum Vorratsbehälter gepresst wird. Der Tank ist dabei so bemessen, dass durch das zusätzliche Hydrauliköl aus den Aktuatoren die korrekte Betriebsmenge des Systems erreicht wird. Somit erübrigt sich eine Befüllung des Systems von außen und es wird kein zusätzlicher Arbeitsschritt in der Fahrzeugmontage benötigt.

Von der Schnelltrennkupplung aus führen die Festleitungen zum Mitteltunnel, wo sie in eine gemeinsame Leitung münden. Diese führt zur Pumpe und besteht aus flexiblem Schlauchmaterial, um die Pulsation der Hydraulikpumpe bestmöglich zu isolieren. Der Verlauf der Leitungen ist dabei so ausgelegt, dass er sowohl für heck- als auch für allradgetriebene Modelle passt.

Das Pumpenaggregat, das für den benötigten hydraulischen Druck sorgt, befindet sich unter dem Unterboden des rechten

Rücksitzes und besteht aus Antriebsmotor, Pumpe, Ventilblock und Vorrats-tank mit Hydrauliköl. Das Aggregat ist entkoppelt über Gummibuchsen gelagert und von einem IP67-Gehäuse vor Staub und Wasser geschützt. Zur akustischen Isolation (Luft und Körperschall) umgibt Formschaum die gesamte Pumpen-/Ventileinheit (siehe Abbildung oben rechts).

Letztere besteht aus angepassten Komponenten, die ursprünglich im Verdeckantrieb des 911 Cabriolets eingesetzt wurden. Um die gewünschte Schallisolation zu erreichen, wurde während der Entwicklung die Dichte des Formschaums von 80 kg/m³ auf 100 kg/m³ angepasst. Dabei war das Ziel, die Akustik speziell in dem für das menschliche Gehör am stärksten wahrnehmbaren Frequenzbereich um 1.000 Hz zu optimieren. Im direkten Vergleich zeigt das höhere Raumgewicht im hochfrequenten Bereich tiefere Terzbänder und im tieffrequenten Bereich höhere Terzbänder. Dies äußert sich subjektiv in einem voluminöseren und wertigeren Pumpengeräusch (siehe Abbildung auf Seite 21).

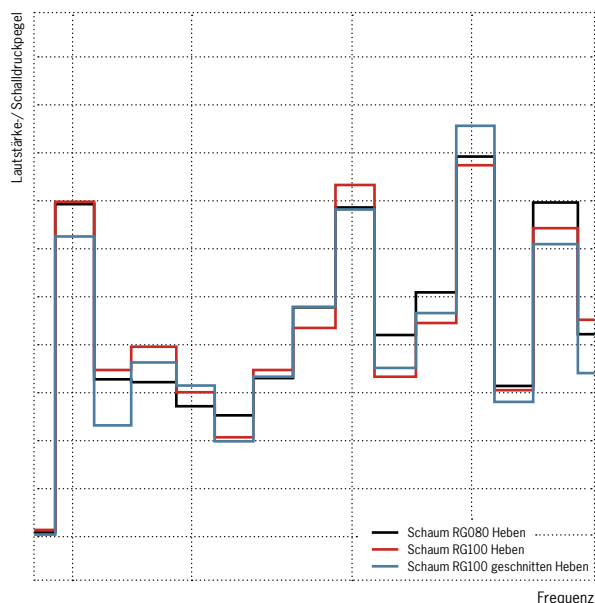
Der Systemaufbau macht Arbeiten an der Anlage durch den Kundendienst oder bei Reparaturen sehr einfach. Zum Befüllen und Entlüften muss lediglich eines der beiden Vorderräder demontiert werden. Als Hilfswerkzeug dient nun der Schlauch,

wie er bereits in der Serie verbaut wird, und an dem die Ringöse abgetrennt wird. Er ist als Einzelteil lieferbar. Zum Entleeren des Systems wird das so hergestellte Hilfswerkzeug über die Schnelltrennkupplung im Radkasten angeschlossen und das System anschließend mittels der Diagnosefunktion des Steuergerätes komplett entleert.

Um das System anschließend wieder auf die benötigte Betriebsmenge aufzufüllen, wird der Schlauch mit dem offenen Ende in einen Behälter mit Hydrauliköl getaucht. Mit der Diagnosefunktion kann so das Öl angesaugt werden. Zum Abschluss der Neubefüllung des Systems wird das Hilfswerkzeug von der Schnelltrennkupplung entfernt und der Aktuator mit dem regulären Anschlusschlauch wieder angeschlossen.

Gesteuerte Eigenerwärmung für volle Funktion bis -25°C

Das verwendete Hydrauliköl (Vitamol ZH-M) wird im Tieftemperaturbereich zunehmend viskoser, was die Systemperformance maßgeblich beeinflusst. Zur Optimierung der Tieftemperaturperformance wurden zunächst die Querschnitte im System identifiziert, die maßgeblich sensitiv auf eine hohe Fluidviskosität reagieren. Dabei handelt es sich vor allem um Bereiche innerhalb des Ventilblockes der Versorgungseinheit. Um die gewünschten Senk- und Hebezeiten auch bei Temperaturen um -25°C zu gewährleisten, wurde auf Basis dieser Erkenntnisse ein Lösungskonzept erarbeitet. Dabei wird



Pumpengeräusche

das System unterhalb der Temperaturgrenze von -5°C automatisch aktiviert und das Öl in einem internen Kreislauf erwärmt. Damit steht dem Fahrer das Liftsystem auch bei sehr tiefen Temperaturen ohne Einschränkungen zur Verfügung. ■

Steuergerät mit umfangreichen Überwachungsfunktionen

Komplettiert wird das System mit einem Steuergerät im Fahrzeuginnenraum. Die Programmierung berücksichtigt dabei zahlreiche Funktionen, beispielsweise:

- > Das Absenken des Vorderwagens wird verhindert, wenn eine der beiden Fahrzeigtüren geöffnet ist (Einklemmschutz).
- > Wird während des Absenkvorgangs eine Tür geöffnet, schaltet die Steuerung automatisch wieder auf Anheben.
- > Während und zum Abschluss des Hebens oder Senkens der Vorderachse prüft das System die Standhöhe mit einer Plausibilisierungsfunktion.
- > Je nach Fußgängerschutzgesetzgebung kann eine Ländervariantensteuerung für die automatische Absenkgeschwindigkeit erfolgen.
- > Die Zugstufendämpfung der aktiven Porsche-Dämpferregelung PASM wird auf ein höheres Kraftniveau gebracht, um bei „Lift aktiv“ zur Komfortsteigerung beizutragen.
- > Zur Komfortsteigerung, insbesondere in akustischen Belangen, erfolgt eine gesteuerte Stromabschaltung im Endanschlag des Hubvorgangs.
- > Um eine möglichst lange Lebensdauer des Hydraulikaggregats sicherzustellen, ist ein Temperaturmodell hinterlegt.
- > Diagnosefunktionen ermöglichen das Entleeren und Befüllen im Kundendienst.

Effizientes Testing

Steuergeräteentwicklung und -erprobung mit individuell zugeschnittenen Prüfständen

Das Netzwerk an Regelsystemen für die Fahrdynamik wird immer umfangreicher und leistungsfähiger. Insbesondere bei der Entwicklung von Kleinserienfahrzeugen, noch dazu im Hochleistungsbereich, stehen die Ingenieure vor beträchtlichen Herausforderungen. Mit automatisierten Tests und simulierten Erprobungen spart Porsche Engineering sowohl Zeit als auch Kosten.

Von Holger Dinkelaker und Philipp Eiber



Lenkungs-HiL mit Echtzeitrechner, Fahrerplatz, EPS und E-Motor



Simulationsumgebung/Bedienpanel

Angesichts des ständig steigenden Leistungspotenzials von Premiumfahrzeugen ist die Entwicklung und Erprobung der Steuerung fahrdynamisch relevanter Systeme eine besondere Herausforderung. Zunächst müssen sie dem Fahrer selbst bei sehr hohen Geschwindigkeiten jederzeit eine sichere Kontrolle gewährleisten. Dazu kommt die extreme Spreizung zwischen den verschiedenen Fahranforderungen: Vom entspannten oder dynamischen Fahren auf der Landstraße über eine schnelle Autobahnfahrt bis hin zum Einsatz auf der Rennstrecke müssen die Erwartungen der Kunden erfüllt werden.

Diese Funktionalität stellt hohe Anforderungen an die Steuergeräte. So sehen aktuelle Fahrzeugkonzepte eine aktive Fahrwerkregelung aus überarbeiteten Standardkomponenten kombiniert mit Eigenentwicklungen vor, die auf die individuellen Fahrzeuganforderungen zugeschnitten sind. Das umfasst beispielsweise aktive Dämpfer und Federung, Stabilisierungs- und Bremssysteme, variable Aerodynamik und adaptive Lenkung. Dies ermöglicht eine vollumfängliche Absicherung der Systeme.

Automatisierte Tests ergänzen simulierte Erprobungen

Bei der Entwicklung exklusiver Kleinserienfahrzeuge haben die Faktoren Zeit und Wirtschaftlichkeit besondere Bedeutung. Je früher im Entstehungsprozess Steuergeräte und deren Zusammenarbeit geprüft und optimiert werden können, desto schlanker und effizienter ist die Gesamtentwicklung. So nutzt Porsche Engineering hierfür unter anderem eigens konzipierte Hardware-in-the-Loop-Prüfstände (HiL-Prüfstände). Dabei simuliert der Prüfstand für die Fahrwerksteuergeräte eine möglichst reale Fahrzeugumgebung und kontrolliert die spezifizierten Regelfunktionen sowie das gewünschte Systemverhalten. Die HiL-Prüfungen erlauben auch gefahrlose Fail-Safe-Tests, in denen der Ausfall von Komponenten, die Fehlerersatzreaktionen oder das Verhalten bei fehlerhafter Nutzung überprüft werden. Dies ermöglicht eine vollumfängliche Absicherung der Systeme auch unter extremen Anforderungen.

Zusätzlich werden alle Steuergeräte auf ihre Interaktion mit dem restlichen Fahrzeug sowohl im Verbund mit den >



Maßgeschneiderter Fahrwerks-HiL für Systeme ohne Fahrer-Feedback

anderen Steuergeräten als auch im Einzeltest verifiziert. Dieses Prüfverfahren kontrolliert unter anderem die Netzwerkschnittstellen, das Kommunikations- und Aufstartverhalten sowie die Signalisierung von Warnungen und erkannten Fehlern. Die HiL- und Labortests stellen somit eine wichtige Basis für die Entwicklung und Qualifizierung des Fahrzeugs dar. In automatisierten Prüfungen werden Tausende zuvor definierte Prüfschritte in verschiedenen Konstellationen erprobt.

Simulierte Fahrtests dies- und jenseits des Grenzbereichs

In diesen synthetischen Tests ist das Systemverhalten zwar simulierbar, aber nicht für den Prüfer erfahrbar. Um eine möglichst sinnvolle Interpretation der Messwerte zu ermöglichen, ist ein alternativer Ansatz erforderlich. Die elektromechanische Lenkung (EPS, electric power steering) ist eines der

Systeme, mittels dem der Fahrer das Lenkverhalten des Fahrzeuges und das Feedback am Lenkrad direkt erlebt.

Um das Verhalten der EPS und die Lenkmomentrückmeldung erfahrbar zu machen, kombinierten die Porsche-Ingenieure einen HiL-Prüfstand mit einer Sitzkiste (siehe Abbildung auf Seite 22). In einer Closed-Loop-Simulation werden dem Steuergerät Umgebungsbedingungen elektrisch simuliert, während über einen Stellmotor direkt Kräfte auf die mechanische Lenkung und das Powerpack des EPS eingebracht werden. Ein ausgeklügeltes Fahrzeugmodell simuliert auf einem Echtzeitrechner die Fahrsituation, während gleichzeitig über einen Hochleistungsmotor Spurstangenkräfte direkt auf die Lenkung eingepreßt werden.

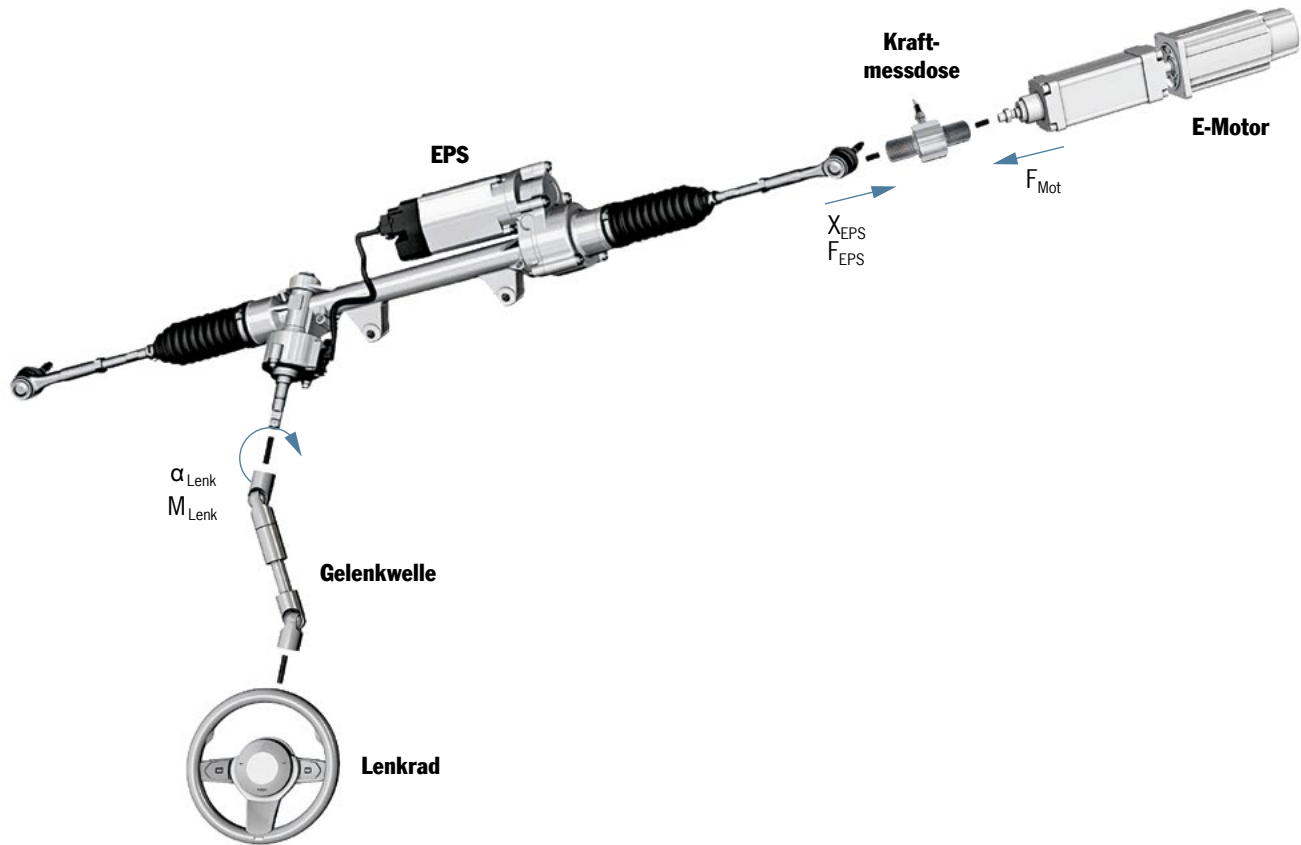
Dieses Konzept erlaubt unter sicheren Bedingungen eine Beurteilung der elektrischen Lenkunterstützung, des Lenkmoments, der Fehlerersatzreaktionen des Steuergerätes beim Ausfall von Komponenten und der Beherrschbarkeit in dieser Situation auch bei (simuliertem) Top Speed. Die Simulationsumgebung ermöglicht die Erfassung und Bewertung aller relevanten Messdaten, welche die Ingenieure dann in Kombination mit ihrer subjektiven Einschätzung des Lenkrad-Feedbacks zu einer Beurteilung des Systems zusammenfassen können. Die optische Simulation der Fahrsituation unterstützt den Tester bei der Beurteilung, indem sie Zahlen und Messwerte in eine nachvollziehbare Darstellung transferiert.

Vorteile des Prüfstands: Sicherheit, Wirtschaftlichkeit, Verfügbarkeit

Mit diesem Simulator kann jedes beliebige Fahrmanöver auch bei Höchstgeschwindigkeit auf einer virtuellen, unendlich großen Dynamikfläche gefahrlos erprobt werden. Sollten die



Visualisierung des Lenkungsverhaltens auf dem HiL (auf Basis TORCS, The Open Racing Car Simulator licensed under the GPL)



Mechanischer Aufbau

Rückwirkungskräfte auf das Lenkrad im Extremfall zu groß werden, sorgt eine implementierte Sicherheitsschaltung dafür, dass der HiL-Prüfstand sich abschaltet. Das Verfahren ermöglicht ausführliche und bessere Systemtests selbst in extremen Geschwindigkeits- und Beschleunigungsbereichen.

Weitere Vorteile des eigens entwickelten Prüfstandes liegen in seiner Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit. Im Unterschied zu marktüblichen standardisierten HiL-Prüfeinrichtungen beschränkt sich die individuelle Konstruktion nur auf die benötigte Testumgebung für das Lenksystem und ist somit kostengünstiger. Aufgrund der Kombination mit der Sitzkiste verringert der Prüfstand außerdem auch die Lücke zwischen der rein theoretischen Softwareprüfung im Rechner und der praktischen Erprobung im Fahrzeug. Dadurch konnte die bei der Entwicklung von Kleinserienfahrzeugen übliche geringe Verfügbarkeit von Prototypen kompensiert werden. Überdies steht der HiL-Prüfstand jederzeit und

unabhängig von Tageszeiten und klimatischen Bedingungen zur Verfügung.

Mit diesem speziellen Prüfplatz bieten die Porsche-Ingenieure eine exakt auf die Anforderungen zugeschnittene Lösung. Er ermöglicht die Entwicklung einer elektromechanischen Lenkung in einem wesentlich kürzeren Zeitraum als üblich. Auch das Systemverhalten und die korrekte Umsetzung spezifizierter Funktionen können dadurch frühzeitig beurteilt und entsprechend Rückmeldung an die Fahrzeugentwicklung und den Lieferanten der Lenkung gegeben werden. Fehler aller Art sind bei Bedarf im Prüfstand ohne großen Aufwand reproduzierbar und daher zügig zu beheben. Dem Fahrzeughersteller bleibt damit mehr Entwicklungszeit, um sich im Rahmen von Prototypen auf die Optimierung der Systemparameter und des gewünschten Fahrverhaltens zu konzentrieren. ■

Technologie, Zukunft, Tradition.

____ Dr. Michael Steiner, Entwicklungsvorstand der Porsche AG, und Malte Radmann, Geschäftsführer von Porsche Engineering, über die Zukunft der Sportwagenentwicklung, innovative Ingenieurdienstleistungen und die Porsche-Kundenentwicklung.

Interview: Frederic Damköhler; Fotos: Victor Jon Goico

Herr Dr. Steiner, wie begegnet Porsche den aktuellen Trends wie etwa autonomes Fahren oder Connectivity?

Dr. Michael Steiner Innovationen spielen für Porsche seit Anbeginn eine fundamentale Rolle, und das wird sich auch in Zukunft nicht ändern. Nur damit können wir Kunden begeistern. Elektrifizierung, Digitalisierung und Konnektivität stellen die Automobilbranche vor neue Herausforderungen. Daher arbeiten wir seit jeher kontinuierlich an der Zukunft, um diesen und weiteren Herausforderungen erfolgreich zu begegnen.

Wie genau sehen Porsche-Lösungen für die genannten Zukunftsthemen heute aus?

Dr. Steiner Schon der neue Panamera macht deutlich, wie es uns gelingt, traditionelle Porsche-Gene mit den zukunftsweisenden Technologien zu verbinden, um ein neues Gefühl der Mobilität zu ermöglichen. Durch die Vielzahl von Kommunikations-, Komfort- und Assistenzsystemen, die im Panamera integriert sind, verändert dieses Fahrzeug schon heute die Mobilität. Mit dem Porsche InnoDrive wurde beispielsweise ein elektronischer Co-Pilot entwickelt, welcher bei Bedarf zugeschaltet werden kann, um die Fahreffizienz zu

erhöhen. Insgesamt nutzen wir ein breites Spektrum an Fahrassistenzsystemen dazu, ein neues Mobilitätserlebnis zu schaffen, behalten dabei jedoch stets den menschlichen Fahrer im Fokus.

Wo wird diese Reise bei Porsche hinführen?

Dr. Steiner Konnektivität und Fahrerassistenzsysteme mit der Tendenz hin zum pilotierten Fahren sind auch für uns spannend. Nicht weil wir von einem fahrerlosen Auto träumen, sondern weil wir sehr wohl wissen, dass unsere Kunden auch mit einem Porsche mal im Stau stehen. In solchen Situationen wollen wir sie entlasten. Einen weiteren Komfortvorteil bietet das automatisierte Einparken. Aber sobald die Bahn wieder frei ist oder sich zum Beispiel eine Landstraße anbietet, auf der der Kunde selbst das Lenkrad in die Hand nehmen möchte, werden wir es unseren Kunden ermöglichen, den Fahrspaß wieder zu genießen. Und auch die Konnektivität bietet viele Möglichkeiten: Online-Updates für erweiterte Funktionen etwa, aber auch die Verknüpfung der Intelligenz der Fahrzeugsensorik mit Schwarminformationen. Was man daraus machen kann, was unsere Fahrzeuge möglicherweise noch sportlicher macht: Da haben wir gute Ideen und werden einige Überraschungen liefern.



Dr. Michael Steiner: „Zur Verknüpfung der Intelligenz der Fahrzeugsensorik mit Schwarminformationen werden wir einige Überraschungen liefern.“

Herr Radmann, welche Auswirkungen haben diese Trends auf die Porsche-Kundenentwicklung?

Malte Radmann Als Entwicklungsdienstleister müssen wir Trends frühzeitig wahrnehmen und diesen möglichst immer einen Schritt voraus sein, um stets die passenden Lösungen anbieten zu können. Der Blick für Branchen- und Marktveränderungen ist essenziell. Ein Entwicklungsdienstleister muss besonders flexibel und agil handeln können, um wettbewerbsfähig zu sein. So haben wir einhergehend mit den vorherrschenden Trends und Marktentwicklungen unsere Strategie weiterentwickelt. Wir fokussieren uns dabei auf drei strategische Geschäftsfelder, die unser Geschäft in Zukunft prägen werden: Derivat- und Systementwicklung, Testing und Digitalisierung.

Womit beschäftigen Sie sich dabei im Einzelnen?

Radmann Im Rahmen der Derivat- und Systementwicklung treiben wir die klassischen Themen der Fahrzeugentwicklung weiter voran und ergänzen sie unter anderem um aktuelle Trends im Bereich virtueller Methoden. Unter dem Bereich Testing verstehen wir neue Methoden des virtuellen Testings, aber natürlich auch die klassische Erprobung von sämtlichen vom Kunden entwickelten Fahrzeugen, Systemen, Bauteilen oder Konzepten. Das Geschäftsfeld Digitalisierung umfasst Themen der digitalen Transformation im Fahrzeug und fahrzeugnahen Umfeld. Mit der Gründung unserer Tochtergesellschaft für Digitalisierung in Cluj-Napoca im vergangenen Jahr stellen wir sicher, im sogenannten europäischen Silicon Valley direkt am Puls der Zeit zu ➤

sein und an den neuesten Entwicklungen dieses Themenfelds teilzuhaben.

Dr. Steiner Gemeinsam mit der Porsche Digital GmbH, die wir im Frühjahr 2016 gegründet haben, wird die Tochtergesellschaft in Cluj eine wichtige Rolle bei der digitalen Transformation in der Automobilentwicklung spielen.

Welche Rolle wird das Testgelände in Nardò für die Erprobung zukünftiger Fahrzeugkonzepte spielen?

Radmann Nardò hat eine strategische Funktion inne. Das Prüf- und Testgelände ist zu einem integralen Bestandteil des Porsche Konzerns geworden und gleichzeitig ist es weiterhin für die gesamte Automobilindustrie als Ressource von Bedeutung. Im Fokus steht zukünftig die Weiterentwicklung von Nardò als exzellentes Testzentrum für Digitalisierung, teil- und vollautonomes Fahren, ohne dabei die klassische Fahrzeugerprobung aus dem Blick zu verlieren. Jedoch steht Testing für uns bei Weitem nicht nur für das Gelände in Nardò: Testing und Erprobung beginnen bei einzelnen kleinen Komponenten und müssen bereits in frühen Entwicklungsstadien erfolgen, insbesondere auf virtueller Ebene. Neben den relevanten technischen Ressourcen – u. a. im Porsche Entwicklungszentrum Weissach – verfügen wir über erfahrene Mitarbeiter mit den entsprechenden Kompetenzen und können somit umfassende Hardware- und Software-in-the-Loop-Lösungen anbieten.

Die Zukunft der Fahrzeugtechnik beginnt oft auf der Rennstrecke. Welchen Einfluss hat der Motorsport auf die Serienentwicklung bei Porsche?

Dr. Steiner Im Motorsport werden neueste Technologien entwickelt und unter extremen Bedingungen getestet. Hierbei erlangen wir wichtige Erkenntnisse, die in die Serienentwicklung einfließen. So sind die 24 Stunden von Le Mans beispielsweise ein außerordentlicher Härtestest für Hochleistungs-Lithium-Ionen-Batterien und weitere Komponenten. Die Erfahrungen, die wir hier sammeln, sind beispielsweise für die Weiterentwicklung der Elektromobilität enorm wichtig.

Radmann Wir sind besonders stolz darauf, im Rahmen der Batterieentwicklung für den Porsche 919 Hybrid so intensiv am LMP1-Projekt beteiligt gewesen zu sein, von der mechanischen Struktur über die komplette Systemsteuerung bis hin zum Testing. Wir schätzen das Vertrauen, das uns unsere Muttergesellschaft damit entgegengebracht hat, ganz besonders.

Das externe Kundengeschäft ist und bleibt fest im Markenkern von Porsche verankert.

Welche Rolle wird die Kundenentwicklung für Porsche in Zukunft spielen?

Dr. Steiner Porsche und die Kundenentwicklung sind seit jeher untrennbar miteinander verbunden. In der Kundenentwicklung liegt der Ursprung von Porsche. Mit der Gründung seines Konstruktionsbüros startete Ferdinand Porsche im Jahr 1931 in die berufliche Selbstständigkeit – mit Entwicklungsdienstleistungen rund um die Kraftfahrzeugtechnik. Für Porsche stellen die Entwickler von Porsche Engineering heute und auch in Zukunft eine wichtige interne Kompetenzressource dar, die durch Erfahrungen aus beispielsweise branchenfremden Projekten häufig eine differenzierte Sicht auf bestimmte Dinge haben und somit wertvolles Querdenken in Entwicklungs- oder Lösungsfindungsprozesse einbringen können.

Radmann Gleichzeitig verfolgen wir weiterhin mit großer Leidenschaft die Projekte für unsere Kunden der weltweiten Automobilindustrie. Das externe Kundengeschäft ist und bleibt fest im Markenkern von Porsche verankert.

Herr Dr. Steiner, Sie waren selbst von 2002 bis 2005 Generalbevollmächtigter der Kundenentwicklung bei Porsche Engineering. Welche Erfahrungen haben Sie aus dieser Zeit mitgenommen?

Dr. Steiner Besonders beeindruckend finde ich nach wie vor die Vielfalt der technischen Anforderungen, die über die Kundenentwicklung an Porsche herangetragen werden – seien sie aus der automobilen Welt oder aus anderen technischen



Malte Radmann: „Als Entwicklungsdienstleister müssen wir Trends frühzeitig wahrnehmen und diesen möglichst immer einen Schritt voraus sein.“

Bereichen weltweit. Diese Projekte werden von einer hoch motivierten Mannschaft bearbeitet, die sich schnell auf technische Veränderungen und unterschiedlichste Kundenanforderungen einstellt. Ein Unternehmen muss stets ausreichend breit und flexibel aufgestellt sein, um genau dort Kompetenzen zu zeigen, wo die Kunden Unterstützung und Erfahrung benötigen. Diese Flexibilität und die gezielte Kompetenzdefinition stellen sicher, dass wir vor Marktschwankungen gewappnet sind und immer die richtige Lösung für die Kunden parat haben.

Gibt es ein Projekt aus dieser Zeit, das Ihnen in besonderer Erinnerung geblieben ist?

Dr. Steiner Während der Zeit bei Porsche Engineering durfte ich meine ersten großen China-Erfahrungen sammeln. Projekte für den chinesischen Markt mit ganz eigenen Anforderungen und ihren internationalen beziehungsweise interkulturellen Herausforderungen waren besonders spannend für mich. Ich erinnere mich sehr gerne an diese Zeit zurück. ■

Dr. Michael Steiner

Dr. Michael Steiner (52) studierte Maschinenwesen an der Technischen Universität München. Nach mehreren Jahren in leitenden Funktionen bei der Daimler AG kam Michael Steiner 2002 zu Porsche. Hier übernahm er die Leitung Innovationen und Konzepte, verantwortete die Baureihe Panamera und war Leiter Entwicklung Gesamtfahrzeug/Qualität. Im Zeitraum von 2002 bis 2005 war er parallel Generalbevollmächtigter der Kundenentwicklung von Porsche. 2016 wurde Michael Steiner zum Vorstand für Forschung und Entwicklung der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG sowie zum Vorsitzenden des Gesellschafterausschusses von Porsche Engineering berufen.

Malte Radmann

Nach seiner Ausbildung war Malte Radmann (63) in leitenden Vertriebsfunktionen für Daimler-Benz Aerospace Dornier sowie für Zung Fu, eine Mercedes-Benz-Vertretung in Hongkong und China, tätig. 1996 kam Malte Radmann zu Porsche in der Funktion als Vertriebsleiter für die Märkte Asien/Europa/USA der Porsche-Kundenentwicklung. Im Jahr 2005 wurde er stellvertretender Generalbevollmächtigter der Porsche Engineering Group GmbH/Porsche Engineering Services GmbH, 2009 ist er zum Vorsitzenden der Geschäftsführung ernannt worden.

— In keinem anderen Fahrzeugtyp ist die Verbindung von Fahrer und Fahrzeug so intensiv wie in einem Sportwagen. Mit dem virtuellen Fahrerplatz der zweiten Generation verfügt Porsche über ein hochmodernes Entwicklungswerkzeug, um diese Verbindung weiter zu verbessern und auf die gesamte Porsche-Produktpalette zu übertragen. Der Simulator ermöglicht präzise Tests der Interaktion zwischen Mensch und Technik praktisch in jeder Phase der Entstehung neuer Fahrzeuge, Systeme oder Funktionen. Das Anwendungsspektrum reicht von der Darstellung virtueller Realität inner- und außerhalb des Autos bis hin zu Versuchen mit kompletten Fahrzeugen.

Virtueller Fahrerplatz

Simulation optimiert Weiterentwicklung von Ergonomie und Nutzerfreundlichkeit

Von Rainer Bernhard und Ingo Krems; Fotos: Victor Jon Goico

Fahrsimulatoren sind in der Fahrzeugentwicklung die frühe Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine. Sie ermöglichen „Testfahrten“ mit virtuellen Fahrzeugen in jeder beliebig digitalisierten Umgebung. Kritische Situationen können risikofrei und reproduzierbar „durchfahren“ werden. Und sie verkürzen die Entwicklungszeiten deutlich: Der Austausch realer Bauteile ist in kürzester Zeit möglich, virtuelle Elemente können auf Knopfdruck verändert werden.

Den ersten virtuellen Fahrerplatz für die Untersuchung des Zusammenspiels von Mensch und Maschine hat Porsche bereits 2007 in Betrieb genommen. Basierend auf den Erfahrungen mit diesem Simulator entstand die zweite Generation dieses Entwicklungswerkzeugs. Einige Konzepte des ersten Systems konnten übernommen werden, andere wurden weiterentwickelt oder neu konzipiert.

Der neue virtuelle Fahrerplatz zeichnet sich vor allem durch seine Variabilität und das breite Einsatzspektrum aus. Auf der Plattform eines Hexapoden können beliebige Nutzlasten mit einem Gewicht von bis zu 1.500 kg montiert werden – anfangen von einfachen Sitzen bis hin zu komplexen Sitzkisten

und sogar ganzen Fahrzeugen, bei denen kleinere Bewegungsimpulse über die Vorderachse eingeleitet werden. Die Entwicklungsingenieure unterscheiden drei Grundfunktionen:

- > *Thron* nennt sich der Modus für reine Visualisierung, bei dem ein Fahrersitz die einzige Hardware darstellt.
- > *Sitzkiste* bezeichnet die Konfiguration für interaktive Fahrsimulation mit voller Bewegungsmöglichkeit des Fahrerplatzes.
- > *Gesamtfahrzeug* ermöglicht die Einbindung eines realen Fahrzeuges.

(Siehe Abbildungen auf Seite 32 oben.)

Hexapod mit sechs Freiheitsgraden simuliert Beschleunigungen

Eine Kernkomponente des virtuellen Fahrerplatzes ist das Bewegungssystem. Es besteht aus sechs unabhängig >



Thron

Das ist der Modus für eine reine Visualisierung, bei dem ein Fahrersitz die einzige Hardware darstellt. Hierbei wird die Bewegungsmöglichkeit des Hexapoden nicht verwendet, stattdessen kann aber die Sechsseitenprojektion inklusive Boden und Decke zur 360°-Visualisierung genutzt werden.



Sitzkiste

Diese Grundfunktion bezeichnet die Konfiguration für interaktive Fahrsimulation mit voller Bewegungsmöglichkeit des Fahrerplatzes. Dabei können unter anderem ergonomisch unterschiedliche Fahrzeugbedingungen untersucht werden. Hierbei werden zusätzliche Force-Feedback-Komponenten eingesetzt wie zum Beispiel Lenkrad oder Pedalerie.



Gesamtfahrzeug

Besonders umfangreiche Prüfungen ermöglicht die Grundfunktion „Gesamtfahrzeug“, sie bindet reale Fahrzeuge in die Simulation ein. Durch die Bewegung der Vorderäder auf der Bewegungsplattform in vertikaler Richtung ist zum Beispiel ein Bremsruck darstellbar.



voneinander ansteuerbaren elektrischen Aktuatoren und einer Plattform für Nutzlasten. Dieser Hexapod mit sechs Freiheitsgraden übernimmt die Darstellung der Beschleunigungen, die im Fahrzeug herrschen. Er ist in einer Grube im Simulatorraum eingebaut und verfügt über einen Bewegungsraum von jeweils rund ± 40 Zentimetern in Längs-, Quer- und Hochrichtung und jeweils ± 30 -Grad-Rotation (Nicken, Rollen und Gieren).

Ein speziell entwickeltes Zugangssystem zur Plattform sorgt dafür, dass Nutzlasten einfach und ohne Zuhilfenahme eines Krans montiert werden können und das Einsteigen in die Sitzkiste keine Treppe oder Leiter erfordert. Neben der leichten Zugänglichkeit spielt Sicherheit eine zentrale Rolle im Konzept des Simulators. Ein Zaun, Überwachungskameras und zahlreiche Sensoren beispielsweise an Gurtschloss und Türen gewährleisten den gefahrlosen Betrieb.

Der Simulatorenbau ermöglicht es, Längs- und Querschleunigung, Aufbaubewegungen (beispielsweise bei Fahrten am Hang oder in Querneigung zur Straße) sowie Schwingungen, wie sie bei Fahrbahnunebenheiten auftreten, nachzubilden. Längs- und Querdynamik eines Fahrzeugs

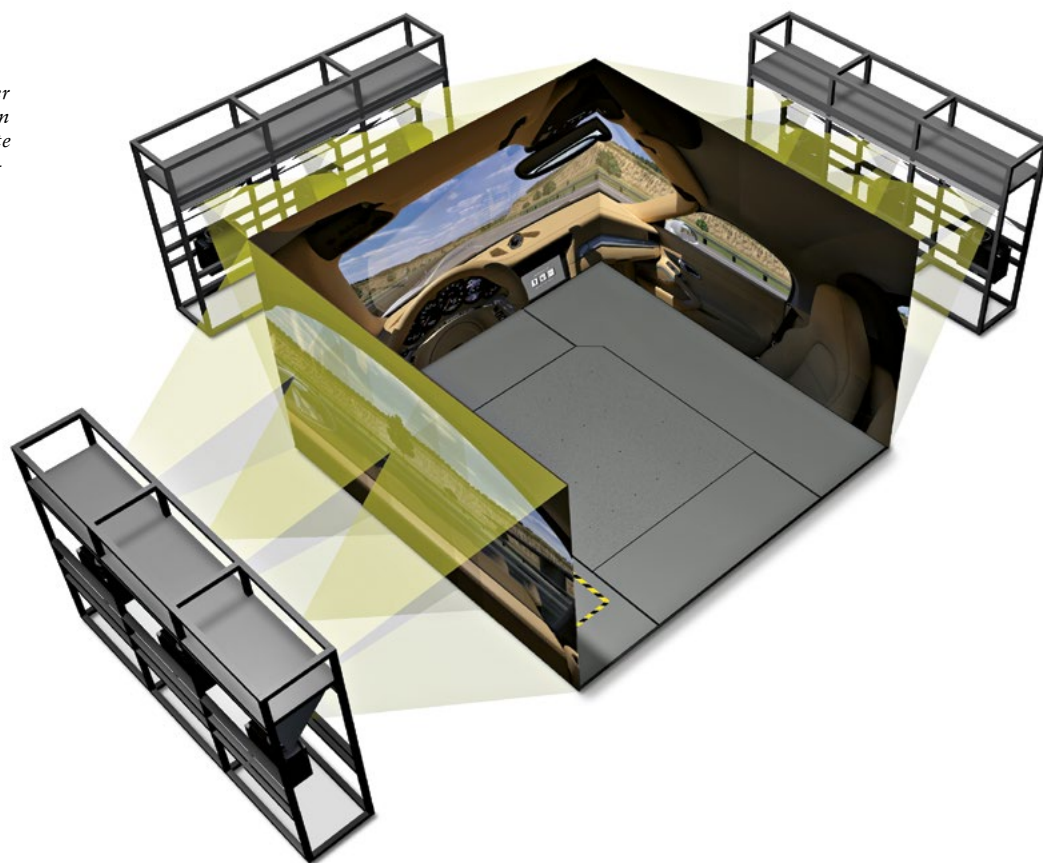
werden im virtuellen Fahrerplatz auf zwei verschiedene Arten dargestellt:

- > *Translation* der Plattform erzeugt ein realistisches Fahrgefühl. Durch die eingeschränkten Verfahrwege aber können die Beschleunigungen zeitlich nur relativ kurz dargestellt werden.
- > *Rotation* der Plattform vermittelt dem Fahrer durch langsames Verkippen der Plattform einen Eindruck von lang andauernder Beschleunigung. Dabei wird die Physiologie des Menschen ausgenutzt: Er nimmt schnelle Drehungen auch tatsächlich als Drehung wahr, langsame jedoch als Änderung der wirkenden Beschleunigung.

Die gleichzeitige Nutzung beider Bewegungsarten erzeugt ein möglichst realistisches Fahrgefühl. Die dargestellte Umgebung passt sich den Bewegungen an.

Die Bewegung des virtuellen Fahrzeugs wird anhand von echtzeitfähigen Berechnungsmodellen ermittelt, welche intern vom entsprechenden Entwicklungsbereich aufgebaut und bereitgestellt werden. Neben der Berechnung der Position des Fahr-

Für eine detaillierte Darstellung der computergenerierten Bilder auf den Projektionsflächen werden pro Seite jeweils drei hochauflösende Stereoprojektoren verwendet. Zusätzlich gibt es noch sechs weitere Projektoren für die Decken-, Boden- und Rückenprojektion.



zeugs in der virtuellen Umgebung erfolgt ebenso die Bestimmung von Beschleunigungen, der Aufbaubewegungen und der Lenkkräfte. Die Eingaben des Fahrers wie Lenkwinkel und

Pedalstellungen dienen als elektronische Eingangssignale in die Fahrdynamikberechnungen. Im sogenannten Motion Cueing werden die berechneten Beschleunigungen im Fahrzeug auf die Bewegung des Hexapoden übertragen.



Die Projektion der Bilder erfolgt von hinten über hochpräzise optische Spiegel auf die Leinwände. Dadurch werden Schatten von Objekten oder Menschen im Innenraum vermieden.

Dreidimensionale Visualisierung über Rückprojektionsscheiben

Die Darstellung der Umgebung und der Fahrzeugkomponenten, die nicht physisch vorhanden sind, erfolgt durch Projektion auf bis zu sechs Seiten eines Quaders. Bis zu 15 Projektoren erzeugen die Grafiken auf speziell beschichteten Rückprojektionsscheiben. Der Quader verfügt über eine Kantenlänge von $4,2 \times 4,2 \times 2,6$ Metern. Diese Anordnung wird Cave Automatic Virtual Environment (CAVE) genannt.

Pro Seite erzeugen die Projektoren rund 3.840×2.160 Pixel. Das entspricht in etwa der heute in digitalen Kinos verwendeten sogenannten 4K-Auflösung. Durch ein aktives Stereoverfahren können dreidimensionale Grafiken generiert werden, die der Betrachter über spezielle Brillen als räumliches Bild wahrnimmt. ➤

Ein optisches Trackingsystem ermöglicht das Messen der genauen Position des Fahrerkopfes innerhalb der CAVE. Diese Information wird von den Grafik-PCs benötigt, um die physikalisch korrekte Perspektive des Fahrers darzustellen. Das hat zur Wirkung, dass der Fahrer je nach Kopfposition einen Fußgänger sehen kann oder nicht, weil dieser zum Beispiel von der A-Säule des Fahrzeugs verdeckt ist.

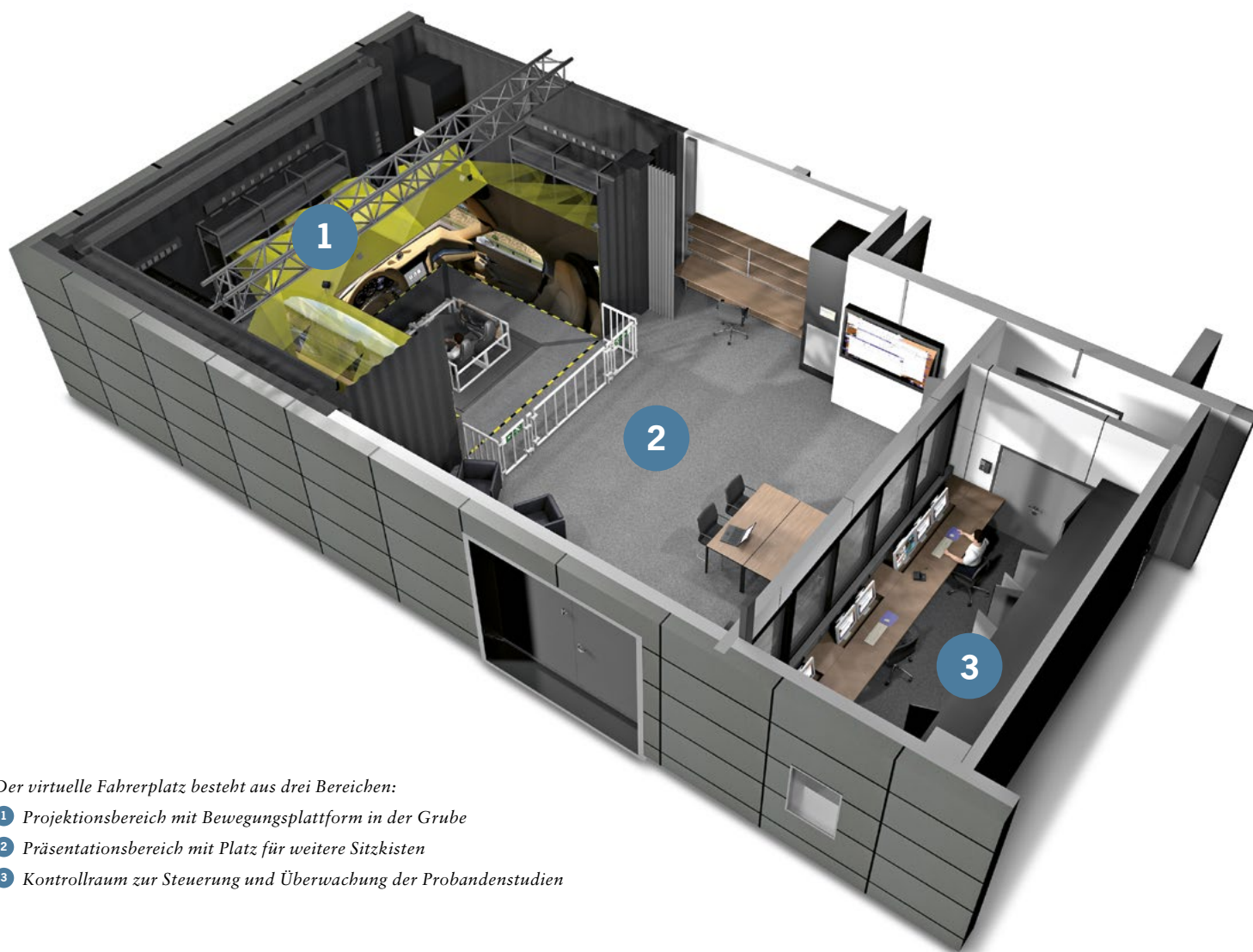
Für eine realistische Immersion, wie das Eintauchen in die virtuelle Realität genannt wird, ist auch die Simulation von Sound nötig. Hierbei werden nicht nur die Geräusche des eigenen Fahrzeugs erzeugt, sondern auch die der Umgebung, wie zum Beispiel vorbeifahrender Autos.

Alle Systeme des Fahrsimulators sind echtzeitfähig und kommunizieren untereinander mit sehr hohen Datenraten. So wird die Eingabe eines neuen Lenkwinkels über einen Datenbus an

die Fahrdynamiksimulation übermittelt, welche daraus die neue Position des Fahrzeugs in der virtuellen Umgebung errechnet und anschließend die Koordinaten via Netzwerk an die Grafik-PCs versendet, wo dann die 3D-Visualisierung erstellt wird. Das alles erfolgt mit Taktraten von 60 Hertz (Visualisierung) bis 1.000 Hertz (Fahrdynamikberechnung).

Testkandidaten: Rückspiegel, Kofferräume, Assistenzsysteme

Porsche setzt den virtuellen Fahrerplatz für neue Fahrzeugkonzepte wie den vollelektrischen Mission E ebenso ein wie für die Weiterentwicklung aller bestehenden Baureihen. Unter anderem geht es dabei um die beiden Schwerpunkte Ergonomie und Mensch-Maschine-Interaktion (HMI). Bei der Ergonomie stehen beispielsweise Sichtuntersuchungen etwa von Rückspiegeln, Form und Lage der Fahrzeugscheiben sowie



Der virtuelle Fahrerplatz besteht aus drei Bereichen:

- ❶ Projektionsbereich mit Bewegungsplattform in der Grube
- ❷ Präsentationsbereich mit Platz für weitere Sitzkisten
- ❸ Kontrollraum zur Steuerung und Überwachung der Probandenstudien



Am Steuer eines virtuellen Fahrzeugs: Die getrackte 3D-Brille sorgt dafür, dass der Fahrer die physikalisch korrekte Perspektive räumlich wahrnehmen kann. Genau wie beim echten Fahren ist der Fahrer aus Sicherheitsgründen angeschnallt.

Kamerasystemen auf der Agenda. Dazu gehören aber auch die Überprüfungen von aktiven Sicherheitsfunktionen und von Fahrzeugkonzepten, zum Beispiel Kofferraumvarianten. Im HMI-Bereich geht es beispielsweise um das Testen von Fahrerassistenzsystemen und um die Gestaltung von Informationsübermittlungen – mit dem Ziel, die entsprechenden Komponenten so anzuordnen, dass der Fahrer Informationen schnell aufnehmen und entsprechend zügig reagieren kann. Um reale Fahrzeugkomponenten als Teil der Simulation verwenden zu können ist es nötig, Steuergeräte – etwa ein Kombiinstrument oder Taster – über CAN-Bus anzusteuern und die Funktion durch Restbussimulation zu gewährleisten.

Ein elementarer Bestandteil des Simulators ist das Erfassen und Speichern der relevanten Daten einer virtuellen Fahrt. Dabei geht es nicht nur um das Verhalten des simulierten Fahrzeugs allein, sondern auch um die physiologischen Daten des Fahrers in Bezug auf seine Umgebung. Dadurch können Einflüsse und Wechselwirkungen, beispielsweise durch die Position der simulierten Fahrzeuge in der Nähe und Fahrerreaktionen wie Augenposition oder Kopfdrehwinkel, untersucht und bewertet werden.

Simulator bewährt sich als fachübergreifendes Entwicklungstool

Die Testergebnisse aus dem Simulator ermöglichen, im Fahrzeugentwicklungsprozess sehr früh Aussagen über die Funktion und Wirkung des Fahrzeugs und darin implementierter Komponenten zu treffen. Insbesondere Systeme, bei denen der Mensch mit dem Fahrzeug interagiert, sind für die Analyse in dieser Simulationsumgebung prädestiniert. Darüber hinaus nutzt Porsche den virtuellen Fahrerplatz auch als Plattform, auf der die Ingenieure der verschiedenen Disziplinen fachbereichsübergreifend Themen testen, diskutieren und präsentieren sowie über diese entsprechend entscheiden können.

Die Vorteile zählen sich unmittelbar im Entwicklungsprozess aus: Die Ergebnisse, die im virtuellen Fahrerplatz ermittelt werden, tragen dazu bei, durch vorgelagerte virtuelle Entwicklungszyklen die Qualität der später hergestellten Prototypenfahrzeuge zu steigern und frühzeitig Entscheidungen mit hoher Tragweite zu ermöglichen. Somit führt der virtuelle Fahrerplatz insgesamt zu einer Verkürzung der Entwicklungszeit und zum effektiveren Einsatz der realen Erprobungskomponenten. ■

____ Die Formula Student Electric gilt als Prüfstein für die Ingenieure der künftigen Elektromobilität und ist gleichzeitig ein Pool hochtalentierter Ingenieure. Porsche Engineering unterstützt das daran teilnehmende GreenTeam der Universität Stuttgart seit seiner Gründung 2009 bei der Entwicklung der Elektrorennwagen. Eine Kooperation mit zwei Gewinnern: Die Studenten profitieren vom Praxiswissen, das Unternehmen durch kompetenten Nachwuchs von morgen.





GREEN TEAM mit Porsche-Genen

Von Peter Weidenhammer; Fotos: Felix Bezler und Jörg Eberl

Die Erfolgsbilanz kann sich sehen lassen: dritter Platz in diesem Jahr auf dem Hockenheimring, seit 2009 stets unter den besten sechs der Weltrangliste, im Premierenjahr sogar auf Platz eins und 2015 ein bemerkenswerter Beschleunigungsweltrekord. Jedes Jahr stellt das GreenTeam der Universität Stuttgart mit kompromisslosem Einsatz einen Rennwagen her, der sich in unterschiedlichen Wettbewerben beweist. Auch in diesem Jahr führen die angehenden Ingenieure des GreenTeams mit ihrem von Grund auf selbst entwickelten, konstruierten und aufgebauten Elektrofahrzeug im internationalen Vergleich bei der Formula Student Electric ganz vorne mit.

Die Formula Student

Die Formula Student ist ein internationaler Konstruktionswettbewerb für Studenten mit Austragungsorten wie Barcelona, Melbourne oder Detroit. Für die Teams geht es darum, selbstständig einen Rennwagen zu konstruieren und zu fertigen, um damit gegen Teams aus der ganzen Welt anzutreten. Gewinner ist am Ende nicht unbedingt das schnellste Auto, sondern das Team mit dem besten Gesamtpaket aus Konstruktion, Rennperformance, Finanzplanung und Verkaufsargumenten.

Es gibt zwei Klassen, in denen die Studenten antreten können: Die Formula Student Combustion (FSC) bezeichnet die Klasse mit verbrennungsmotorischen Antrieben, in der Formula Student Electric (FSE) sind es Fahrzeuge mit Elektromotoren, die unter anderem auf dem Hockenheimring getestet werden. Durch die zunehmende Beliebtheit des Wettbewerbs >



Das Probe Design Event: Studenten des GreenTeams im fachlichen Austausch mit Ingenieuren von Porsche Engineering.

muss oft im Voraus eine Bewerbungsphase überstanden werden, bevor es tatsächlich in den Wettbewerb mit Teams anderer Top-Universitäten wie Zürich, Delft und Karlsruhe geht. Erst nach einer strengen Überprüfung, ob die internationalen Formula-Student-Reglements eingehalten wurden, dürfen die Fahrzeuge ins Rennen.

In zwei Disziplinen können insgesamt 1.000 Punkte erreicht werden. Bei den statischen Disziplinen werden die Kosten des Autos, die Ingenieurleistung und fiktive Vermarktung von einer Fachjury bewertet. Bei den dynamischen Disziplinen werden die Wagen auf verschiedenen Kursen einem Praxistest unterzogen – hier sind die Zeit und die Energieeffizienz ausschlaggebend. Da die einzelnen Kategorien unterschiedlich stark gewichtet werden, kann die richtige Taktik den Sieg bringen.

Die Kooperation

Porsche Engineering zählt zu den Hauptsponsoren des GreenTeams und unterstützt nicht nur finanziell, sondern auch durch Sachleistungen und die Bereitstellung von Prüfständen sowie durch Know-how und Beratung im Fahrzeugentwicklungsprozess. „Die Zusammenarbeit mit Porsche Engineering hilft uns bei der Weiterentwicklung unserer Hochvoltkomponenten. Ohne die wertvolle Prüfstandszeit könnten wir nicht so nah an das Limit gehen,“ freut sich Alexander Stemmler (25), Student der Luft- und Raumfahrttechnik und im GreenTeam mitverantwortlich für Aero- und Thermodynamik.

Die langjährige Kooperation zwischen Studenten und Experten im Ingenieurdienstleistungsbereich ist für beide Seiten von

Vorteil. Junge Talente kommen frühzeitig mit Unternehmen in Kontakt und können dabei wertvolle Verbindungen für ihre persönliche berufliche Laufbahn aufbauen. Sie sammeln Praxiserfahrungen und erlernen den Umgang mit Geschäftspartnern. Auch die Unternehmen profitieren vom direkten Kontakt zu Nachwuchsingenieuren und den damit verbundenen Draht zu Universität und Lehre.

Der Rennwagen E0711-7

Beim aktuellen Rennwagen E0711-7 setzte das GreenTeam auf geregelten Allradantrieb mit vier radnahen Wechselstrommotoren. Jede der Elektromaschinen erzeugt bis zu 35 Kilowatt Leistung und ein maximales Drehmoment von 36 Newtonmetern. Die Energie stellt eine Hochvoltbatterie mit 6,8 Kilowattstunden bereit. Um die Wärmeentwicklung bei hohen dynamischen Belastungen zu beherrschen, verfügen Stromspeicher und Inverter über ein ölbasiertes Kühlsystem. Der Monoposto erreicht eine Höchstgeschwindigkeit von 123 km/h. Besonders beeindruckend ist sein Sprintvermögen: Nur rund zwei Sekunden vergehen, bis bei voller Beschleunigung aus dem Stand die 100-km/h-Marke durchbrochen wird. Die dafür verantwortliche Systemelektronik haben die Studenten ebenfalls selbst entwickelt.

Ausgeklügelte Rennwagentechnik steckt auch in Fahrwerk und Aerodynamik. So konstruierten die Nachwuchsingenieure ein platzsparendes und leichtes Monospring-System mit je einer Querfeder pro Achse. Für Anpressdruck und damit hohe Querschleunigungen im Wettbewerb sorgt ein umfassendes Aerodynamikpaket, mit dem der Rennwagen einen Auftriebsbeiwert von $c_A = -2,8$ erreicht.

Vom Konzept bis zum Rennen

Der Entstehungsprozess eines GreenTeam-Rennwagens erstreckt sich über ein Zeitfenster von rund acht Monaten und umfasst die vier Teilabschnitte Konzept, Konstruktion und Design, Fertigung sowie Zusammenbau. Jeweils im September eines Jahres wird aus Erfahrungswerten der letzten Wettbewerbe und durch Wissenstransfer vom Vorjahresteam das Overall-Konzept ausgearbeitet. Die Schwerpunkte liegen dabei auf besonders wichtigen Fahrzeugentwicklungsthemen wie Batteriekühlung, Hochvoltnetz und Aerodynamik. Bereits zu diesem Zeitpunkt beginnt auch die Kooperation mit Porsche Engineering. Dadurch erhält das Team schon frühzeitig professionelles Feedback und Tipps für die Realisierung des Elektrorennwagens.

In der *Konzeptphase* werden sowohl die angestrebten Zielzeiten des Fahrzeugs als auch die sogenannte Verkaufsstrategie genau durchdacht, denn später muss das Team gegenüber den Juroren von Formula Student sein Fahrzeugkonzept, die Kosten und sonstige Entwicklungsspezifika begründen. Im folgenden Arbeitsabschnitt *Konstruktion und Design*, der sich von Oktober bis Mitte Dezember erstreckt, wird der zukünftige Rennwagen am Computer per CAD konstruiert. Im Anschluss daran beginnt in Zusammenarbeit mit Fertigungspartnern der *Aufbau* des Elektrofahrzeuges. Im Rahmen einer langen Phase werden alle Komponenten des Autos im sukzessiven Testbetrieb beansprucht und aufeinander abgestimmt. Als letzter Prozessschritt folgt der *Zusammenbau* aller Komponenten zum kompletten Fahrzeug.

Mit dem Rollout Ende April – der ersten offiziellen Präsentation des Fahrzeugs vor Sponsoren, Unterstützern, Freunden und Familie – erreichen die Studenten eines ihrer wichtigsten Etappenziele. „Wir lernen sehr viel von den erfahrenen Porsche-Ingenieuren und freuen uns dann, auch ihnen unsere eigenen Entwicklungen zu präsentieren“, sagt Alexander Stemmler. Anschließend veranstaltet Porsche Engineering als Hauptsponsor in dieser Phase mit dem Team ein „Probe Design Event“ – als Vorbereitung für die Präsentation des Fahrzeugs vor den Formula-Student-Juroren. Der Rennwagen wird in ähnlicher Form wie beim späteren Wettbewerb vorgestellt und gemeinsam mit den Porsche-Ingenieuren diskutiert und bewertet. Somit können sich die Studenten bereits auf kritische Fragen einstellen und sie erhalten eine unabhängige Einschätzung zu ihrem Rennwagen sowie letzte Tipps. Im Juli und August müssen die Elektrorennwagen schließlich auf den Rennstrecken beweisen, wie erfolgreich Konzept und Taktik im Wettbewerb mit den anderen konkurrierenden internationalen Hochschulteams abschneiden. ■

Das GreenTeam

Das GreenTeam Uni Stuttgart wurde 2009 als gemeinnütziger Verein gegründet und ging aus dem Rennteam Uni Stuttgart e.V. hervor, das Rennwagen mit Verbrennungsmotoren entwickelt. Das GreenTeam strebt dagegen mit einem rein elektrisch betriebenen Fahrzeug bei der jährlich veranstalteten Formula Student in der Kategorie Formula Student Electric einen der vorderen Plätze in der Weltrangliste an.

Jedes Jahr entwickelt ein Team aus 45 Bachelor- und Masterstudenten der Universität Stuttgart unter anderem aus den Studiengängen Fahrzeug- und Motorentechnik, Maschinenbau, Elektromobilität und Umweltschutztechnik ein Gesamtkonzept für einen elektrisch betriebenen Rennwagen. Eine Teilnahme, für die viele Studenten sogar ihr Studium für zwei Semester ruhen lassen, ist erst ab dem vierten Semester möglich. Fast ein Jahr lang tüfteln die angehenden Ingenieure rund 60 Stunden wöchentlich an ihrem E-Fahrzeug, was eine umfassende Auseinandersetzung mit anspruchsvollen Themen wie Regelungstechnik, Leistungselektronik oder Fahrdynamik voraussetzt. Neben dem verantwortungsvollen Umgang mit der Technik spielen auch Aspekte wie Zeitmanagement, Teamwork und Wirtschaftlichkeit eine wichtige Rolle.

In den vergangenen Jahren konnte das GreenTeam auf den internationalen Formula-Student-Events einige Erfolge verzeichnen: So stellten die Stuttgarter Studenten 2015 mit dem E0711-5 einen Beschleunigungsweltrekord auf. Mit einer Zeit von 1,779 Sekunden für den Spurt von 0 auf 100 km/h ist das Elektrofahrzeug im Guinness-Buch der Rekorde eingetragen.





Nachhaltigkeit trifft auf Performance

Der Porsche Panamera 4 E-Hybrid

Hybrid steht bei Porsche von jeher nicht nur für nachhaltige Mobilität, sondern auch für Performance – das zeigen nicht zuletzt die Siege des 919 Hybrid beim 24-Stunden-Rennen von Le Mans in den Jahren 2015 und 2016. Diese Philosophie prägt nun auch den Porsche Panamera 4 E-Hybrid.

Der neue Porsche Panamera 4 E-Hybrid beeindruckt mit einer Systemleistung von 340 kW (462 PS) und verbraucht nur 2,5 Liter je 100 Kilometer im Neuen Europäischen Fahrzyklus für Plug-in-Hybrid-Modelle. Er startet stets rein elektrisch. Bis zu einer Reichweite von 50 Kilometern und einem Tempo von maximal 140 km/h ist der Panamera 4 E-Hybrid als sogenanntes Zero Emission Vehicle unterwegs.

Gleichwohl ist auch dieser Panamera der Sportwagen unter den Luxuslimousinen: Der Allrad-Porsche erreicht eine Spitzengeschwindigkeit von 278 km/h. Ohne Verzögerung stehen aus dem Stand heraus 700 Nm Systemdrehmoment zur Verfügung. Nach 4,6 Sekunden lässt der viertürige Hybrid-Sportwagen die 100-km/h-Marke hinter sich. Das Drehmoment wird auf alle vier Räder übertragen. Die serienmäßige Dreikammer-Luftfederung sorgt dabei stets für eine optimale Balance zwischen Komfort und Dynamik.

Neue Hybrid-Strategie wurde vom Porsche 918 Spyder adaptiert

Die Performance kommt nicht von ungefähr: Porsche nutzt beim neuen Panamera 4 E-Hybrid eine in diesem Segment neue Hybrid-Strategie, die vom 918 Spyder adaptiert wurde. Der 652 kW (887 PS) starke 918 Spyder ist das schnellste Serienfahrzeug, das jemals die Nürburgring-Nordschleife umrundete. Der Rundenrekord von 6:57 Minuten konnte unter anderem dank des zusätzlichen Schubs von zwei Elektromotoren realisiert werden.

Wie beim 918 Spyder, so steht auch die elektrische Leistung des Panamera-E-Motors – 100 kW (136 PS) und 400 Nm Drehmoment – ab dem ersten Antippen des Fahrpedals zur Verfügung. Beim Vorgänger musste das Pedal noch zu mindestens 80 Prozent betätigt werden, um den zusätzlichen Schub des E-Antriebs freizusetzen. Ab sofort spielen der Elektro- und der Benzinmotor von Beginn an harmonisch zusammen. Der E-Motor sorgt analog zum 918 Spyder permanent für zusätzlichen Schub. Im Zusammenspiel mit der >

PANAMERA 4 E-HYBRID

Kraftstoffverbrauch (kombiniert): 2,5 l/100 km
Stromverbrauch (kombiniert): 15,9 kWh/100 km
CO₂-Emissionen (kombiniert): 56 g/km
Effizienzklasse: A+

Leistungscharakteristik des neuen 2,9-Liter-V6-Biturbo-Motors – 243 kW (330 PS) und 450 Nm – entsteht so ein eindrucksvolles Boost-Szenario aus E-Motor und Turboladern.

Im Panamera 4 E-Hybrid wird die elektrische Energie zudem genutzt, um die Höchstgeschwindigkeit zu steigern. Diese neue Art der E-Performance – mehr Leistung, mehr Fahrspaß, weniger Verbrauch – gilt bei Porsche als Leistungs-Kit der Zukunft.

Neues Hybrid-Modul und schnell schaltendes Achtgang-PDK

Der Elektromotor bildet zusammen mit der Trennkupplung zum V6-Benziner die neue Generation des Porsche-Hybrid-Moduls. Im Gegensatz zum elektrohydraulischen System des Vorgängers wird die Trennkupplung beim neuen Panamera durch einen Electric Clutch Actuator (ECA) elektromechanisch betätigt. Der Vorteil sind noch kürzere Reaktionszeiten. Für die Kraftübertragung an den Allradantrieb kommt wie bei den anderen Panamera-Modellen der zweiten Generation ein neues, sehr schnell und effizient schaltendes Porsche-Doppelkupplungsgetriebe (PDK) mit acht Gängen zum Einsatz, es löst die Achtgang-Wandlerschaltung des Vorgängers ab. Der Elektromotor wird über eine flüssigkeitsgekühlte Lithium-Ionen-Batterie mit Strom versorgt. Obwohl der Energiegehalt der Batterie von 9,4 auf 14,1 kWh erhöht wurde, blieb das Gewicht der unter dem Kofferraumboden integrierten Batterie konstant.

Vollständig geladen ist die Hochvoltbatterie über einen 230-V-Anschluss mit 10 Ampere binnen 5,8 Stunden. Nutzt

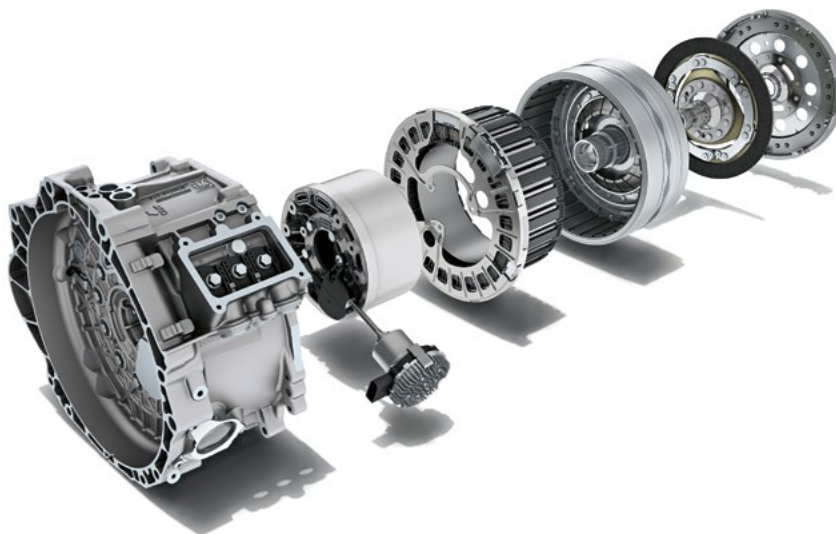


Kombiinstrument mit Power-Meter und hybrid-spezifischen Screens

der Panamera alternativ zum serienmäßigen 3,6-kW-Ladegerät den optionalen 7,2-kW-On-Board-Lader und einen 230-V-Anschluss mit 32 A, ist die Batterie bereits nach 3,6 Stunden „aufgetankt“. Via Porsche Communication Management (PCM) oder der Porsche-App Car Connect (für Smartphone und Apple Watch) kann das Laden auch zeitgesteuert gestartet werden. Darüber hinaus ist der Panamera 4 E-Hybrid serienmäßig mit einer Standklimatisierung ausgestattet, um den Innenraum während des Ladens zu kühlen oder zu heizen.

Porsche Advanced Cockpit mit hybrid-spezifischen Anzeigen

Ein Highlight des Panamera der zweiten Generation ist das neu konzipierte Anzeige- und Bedienkonzept: das serien-



Das Hybridmodul des Panamera 4 E-Hybrid



Antriebskomponenten des Panamera 4 E-Hybrid

mäßige Porsche Advanced Cockpit mit berührungssensitiven Panels und individuell konfigurierbaren Displays. Zwei sieben Zoll große Screens, die den analogen Drehzahlmesser einrahmen, bilden dabei das interaktive Cockpit. Der Panamera 4 E-Hybrid differenziert sich über das auf den Hybrid-Betrieb zugeschnittene Power-Meter von den anderen Versionen der Baureihe.

Die hybrid-spezifischen Anzeigen wurden in ihrer intuitiven Funktionsweise denen des Supersportwagens Porsche 918 Spyder nachempfunden. Das Power-Meter liefert Informationen zu Fakten wie der aktuell abgerufenen respektive der via Rekuperation zurückgewonnenen elektrischen Energie.

Ein 12,3-Zoll-Touchdisplay fungiert indes als zentrales Bedien- und Anzeigeelement des PCM; hybrid-spezifisch lassen sich hier und im Kombiinstrument verschiedenste Informationen abrufen. Ebenso praxisrelevant wie informativ sind der Boost- und der Hybrid-Assistent. Der Boost-Assistent zeigt die zum Boosten verfügbare Energie an. Beim Hybrid-Assistent dienen visuelle Hinweise als Dosierhilfe für die elektrische Antriebsleistung.

Effizienteste Fahrt im Modus „Hybrid Auto“

Im Panamera 4 E-Hybrid gehört das Sport Chrono Paket und damit der im Lenkrad integrierte Mode-Schalter zur Serienausstattung. Über den Mode-Schalter und das Porsche Com-

munication Management werden die verschiedenen Fahrmodi aktiviert. Dazu zählen die aus den anderen Panamera-Modellen mit Sport Chrono Paket bekannten Modi „Sport“ und „Sport Plus“. Hybrid-spezifisch sind die Modi „E-Power“, „Hybrid Auto“, „E-Hold“ und „E-Charge“.

Der Panamera 4 E-Hybrid startet stets im rein elektrischen Modus „E-Power“. Komplett neu entwickelt wurde der Modus „Hybrid Auto“. Hier wechselt und kombiniert der Panamera automatisch die Antriebsquellen. Dieser Modus ermöglicht den effizientesten Betrieb.

Das bewusste Halten des aktuellen Ladezustands ermöglicht der Modus „E-Hold“, um etwa am Zielort in einer Umweltzone elektrisch und damit ohne Emissionen unterwegs sein zu können. Im Modus „E-Charge“ wird die Batterie durch den V6-Motor geladen; der Benzinmotor generiert dazu eine höhere Leistung, als zum eigentlichen Fahren benötigt wird.

Die höchste Performance des Antriebs steht in den Modi „Sport“ und „Sport Plus“ zur Verfügung. Stets aktiv ist dabei der V6-Biturbo. Im Modus „Sport“ wird die Batterieladung stets auf einem Mindestniveau gehalten, um ausreichende E-Boost-Reserven bereitzustellen. Im Modus „Sport Plus“ steht die maximale Performance im Vordergrund; der Panamera erreicht in „Sport Plus“ auch die Höchstgeschwindigkeit von 278 km/h. Außerdem wird in diesem Modus die Batterie schnellstmöglich mit Unterstützung des V6-Biturbo nachgeladen. ■

Numerische Modelle für einfachere Applikation

Funktionen der Motorsteuerung schneller und präziser kalibrieren

— Die Anforderungen an die Spreizung von Motoreigenschaften nehmen stetig zu. Leistung und Effizienz, Dynamik und Abgasqualität sind nur vier Eckpunkte, die es zu vereinen gilt. Um die Vorgaben zu erfüllen, werden die Motorfunktionen und damit die Kalibrierung der Motorsteuerung zunehmend komplexer. Dies trifft insbesondere auf die zwei wesentlichen Bausteine der Motorsteuerung zu: das Füllungs- und das Momentenmodell. Ohne den Einsatz von leistungsstarken Applikationswerkzeugen lässt sich ihre exakte Kalibrierung nicht mehr bewältigen. Porsche Engineering hat dafür eine alternative Methodik auf Basis der modellbasierten Applikation entwickelt.

Von Matteo Skull

Das Füllungs- und das Momentenmodell versetzen die Motorsteuerung (ECU, engine control unit) in die Lage, die aktuelle Zylinderfüllung und das resultierende Moment an der Kurbelwelle entsprechend den Betriebsbedingungen sehr genau zu kalkulieren. Da beide Modellgrößen von nahezu allen weiteren Funktionen der ECU weiterverarbeitet werden, ist ihr Einfluss auf das Motorverhalten wie Fahrbarkeit und Emissionen sehr groß. Dementsprechend hoch sind die Qualitätsansprüche an die Genauigkeit ihrer Kalibrierung. In der ECU werden diese Funktionen von physikalischen und thermodynamischen Modellen abgeleitet und als komplexe Algorithmen implementiert.

Eine der großen Herausforderungen besteht dabei darin, dass die Kennlinien und Kennfelder sehr genau kalibriert werden müssen, obwohl deren Ausgänge keinen direkt messbaren physikalischen und thermodynamischen Größen entsprechen. Aufgrund der Wechselwirkung zwischen den Rechengrößen der Motorsteuerung und der Komplexität der Rechenmodelle ist es mittlerweile unmöglich geworden, das Füllungs- und Momentenmodell bei laufendem Betrieb am Motorprüfstand zu bedaten, also die Kennfelder direkt anzupassen. Die Grundapplikation muss deshalb mit speziellen Werkzeugen erfolgen,

mit deren Hilfe Kennfelder anhand von Messdaten richtig kalibriert werden können. Die Bedeutung von derartigen Tools und deren Anwendung nehmen enorm zu und ihre Entwicklung stellt eine Kernkompetenz der Motorapplikation dar.

Umsetzung von physikalischen Modellen in der Motorsteuerung am Beispiel des Füllungsmodells

Die Umsetzung des Füllungs- und Momentenmodells in der Motorsteuerung erfolgt mit der Implementierung von Gleichungen, die von den Gesetzen der Thermodynamik und der Physik abgeleitet sind. Das Füllungsmodell, welches die Menge an Frischluft im Zylinder berechnet, basiert auf der idealen Gasgleichung und löst diese nach der Gasmasse, der Luft, auf. Zum Lösen der Gleichung ist es aber notwendig, verschiedene Temperaturen und Drücke zu kennen. Da diese jedoch im Serienfahrzeug nicht messbar sind, müssen sie von der ECU nachmodelliert werden. Für die Erstellung des Modells wird der Motor während der Entwicklung mit aufwendiger Messtechnik versehen und unter bestimmten Randbedingungen auf dem Motorprüfstand getestet, bis eine ausreichende Anzahl an Messungen für die Applikation der Modelle zur Verfügung steht.

Die Implementierung der idealen Gasgleichung in der Motorsteuerung erfolgt in Form von Steuer- und Regelkreisen, die Kennfelder und Kennlinien logisch miteinander verknüpfen. Die Kennfelder werden mit Eingangsgrößen adressiert, wie beispielsweise der Motordrehzahl und der Position der Ein- und Auslassventile, welche den Motorbetriebspunkt eindeutig beschreiben und beeinflussen.

Konventionelle Vorgehensweise: viele Iterationsschleifen

Der konventionelle Ansatz für die Kalibrierung der Kennfelder basiert darauf, deren Ausgangsgrößen als Unbekannte zu betrachten und damit ein Gleichungssystem aufzustellen, welches dem physikalischen Modell entspricht. Über Berechnungsprogramme und Solvereinsätze, wie die Methode der kleinsten Fehlerquadrate, können dann Lösungen für die Unbekannten und damit die Kennfeldausgänge bestimmt werden.

Mit diesem konventionellen Lösungsansatz erreicht man zwar eine hohe Kalibrierungsgenauigkeit, dennoch bringt er viele Nachteile mit sich: Damit das Gleichungssystem mathematisch lösbar ist, muss es mindestens so viele Gleichungen wie Unbekannte geben, was eine entsprechend hohe Anzahl an Messungen erfordert. Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass die Werte pro Betriebspunkt berechnet werden und kein sinnvoller Zusammenhang der Lösungswerte über alle Betriebspunkte berücksichtigt wird. Dadurch können sich von Betriebspunkt zu Betriebspunkt stark voneinander abweichende Lösungswerte ergeben, welche in unstetigen Kennfeldverläufen resultieren, die den physikalischen Zusammenhang zwischen den Variablen nicht korrekt abbilden.

Physikalische Grundlage des Füllungsmodells

Ideale Gasgleichung:

$$m = PV/RT$$

Ideale Gasgleichung auf den Ladungswechsel angewendet:

$$\Delta m = m_{in} - m_{out} = P_{in} V_{in} / RT_{in} - P_{out} V_{out} / RT_{out}$$

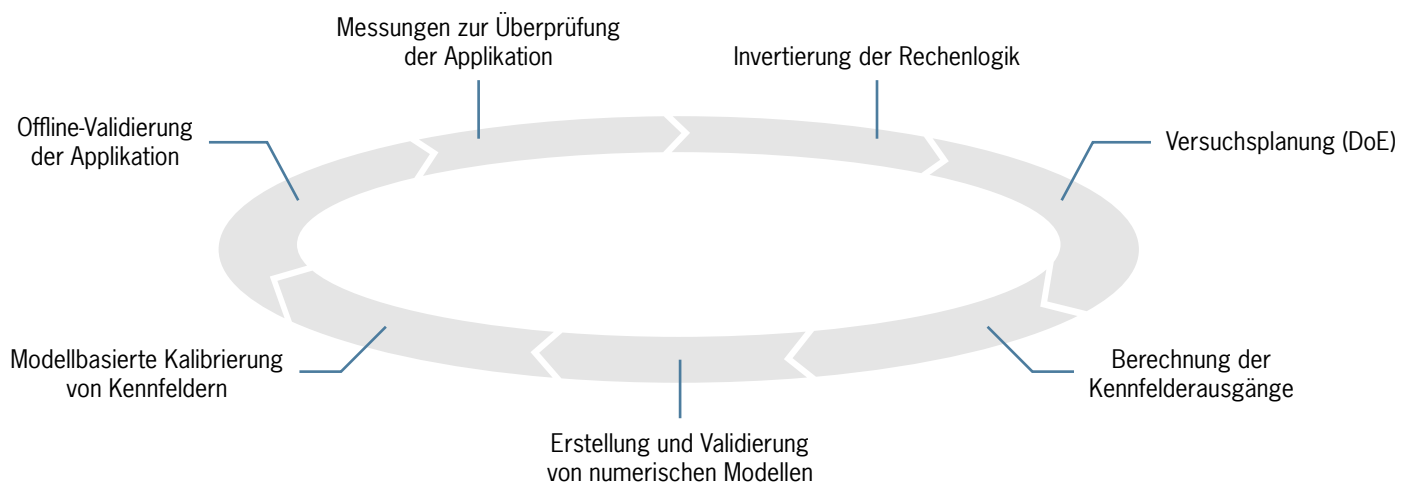
Für die Applikation des Ladungswechselmodells ist die Kalibrierung folgender Modelle nötig:

T_{in} : Brennraumtemperatur-Modell

T_{out} : Abgastemperatur-Modell

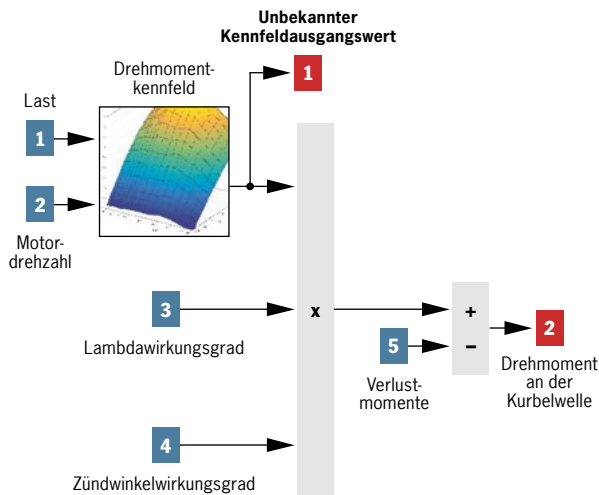
P_{out} : Abgasgegendruck-Modell

Unter dynamischen und transienten Bedingungen können solch unstetige Kennfeldverläufe das Motorverhalten erheblich beeinträchtigen. Deshalb ist es häufig notwendig, die Kennfelder im Nachhinein zu glätten. Das bedeutet jedoch, dass der Bezug zur Physik und zu den ursprünglichen Messdaten noch ungenauer wird. Um diese Nachteile zu vermeiden, gleichzeitig die Qualität der Applikation zu verbessern und die Anzahl an Messungen signifikant zu reduzieren, hat Porsche Engineering eine alternative Methodik entwickelt, die auf der modellbasierten Applikation beruht (siehe Abbildung unten). ➤

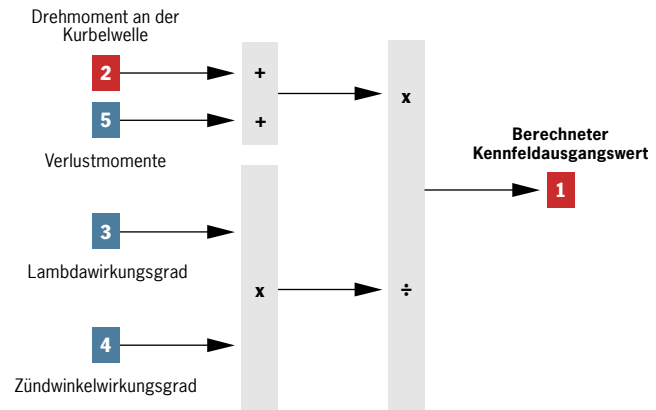


Invertierung der Rechenlogik und Erstellung von numerischen Modellen

Vorwärtspfad



Rückwärtspfad



Alternative Vorgehensweise basierend auf Invertierung der Rechenlogik und numerischen Modellen

Alternative: Invertierung der Rechenlogik und Erstellen von numerischen Modellen

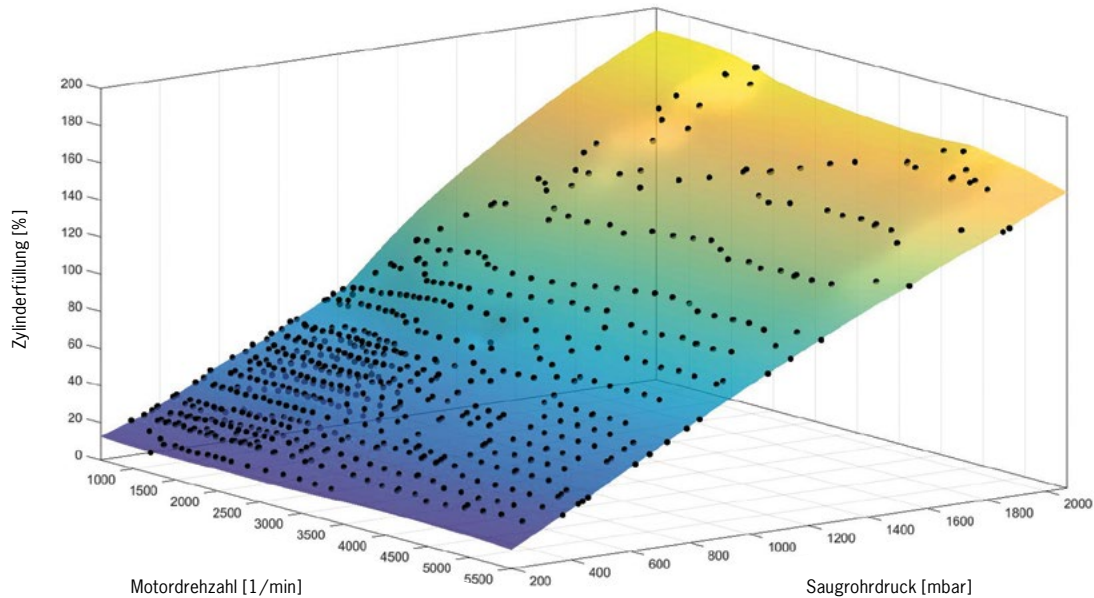
Die alternative Methode besteht aus zwei wesentlichen Schritten: der Invertierung der Rechenlogik der zu bedatenden Funktionen und dem Erstellen von numerischen Modellen (siehe Abbildung oben). Wie bereits beschrieben, sind Kennfelder Bausteine einer Funktion, deren Ausgangswerte in der Praxis nicht direkt messbar sind und deren Ausgang keiner konkreten messbaren physikalischen Größe entspricht. Ausgang und Eingänge einer ganzen Funktion, wie Abgastemperatur oder Abgasgegendruck im jeweiligen Modell, entsprechen jedoch konkreten physikalischen Größen, die am Motorprüfstand exakt gemessen werden können.

Durch Invertierung des logischen Pfades einer kompletten Funktion, deren Ausgang einer messbaren physikalischen Größe entspricht, kann auf den genauen Wert des Kennfeldausganges für jeden gefahrenen Betriebspunkt zurückgerechnet werden. Sobald die Kennfeldausgänge für alle Betriebspunkte bekannt sind, werden numerische Modelle erstellt, welche die Zusammenhänge zwischen Ein- und Ausgangsgrößen der Kennfelder errechnen. Anhand dieser Modelle werden schließlich die entsprechenden Kennfelder kalibriert. Vor der Freigabe der Applikationsdaten wird die gesamte Berechnungskette des Füllungs- und Momentenmodells in der Simulation überprüft und gegebenenfalls optimiert. Messungen am Motorprüfstand verifizieren die Kalibrierung zum Abschluss.

Modellbasierte Applikation mit großen Vorteilen

Ein Vorteil der Erstellung eines numerischen Modells vor der eigentlichen Kalibrierung des Kennfeldes besteht darin, dass der Applikationsingenieur die Zusammenhänge zwischen den Ein- und Ausgängen eines Kennfeldes bildlich darstellen kann. Dieser Schritt ermöglicht es ihm, den tendenziellen Verlauf des Kennfeldes aus thermodynamischen Gesichtspunkten zu beurteilen. Dabei können eventuelle Singularitäten des Modellverlaufs kritisch hinterfragt und, falls notwendig, die Stützstellen des Kennfeldes angepasst oder zusätzliche Messpunkte gefahren werden. Einen weiteren wesentlichen Vorteil stellt die Möglichkeit dar, anhand des numerischen Modells Werte für beliebige Kennfeldstützstellen exakt zu berechnen. Das dargestellte numerische Modell (siehe Abbildung auf Seite 47 oben) zeigt, ob das modellierte Drehmoment sich erwartungsgemäß über Last und Drehzahl verhält und ob an genügend Punkten gemessen wurde, um das Kennfeld genau und sinnvoll zu bedaten.

Die Kalibrierung der Kennfelder und Kennlinien hängt sehr stark von der Genauigkeit der Modelle ab, für die wiederum Qualität und Verteilung der Messdaten entscheidend sind. Aus diesem Grund wird der Einsatz der modellbasierten Applikation bereits in der Versuchsplanung berücksichtigt, da im Rahmen von Rastermessungen und Parametervariationen die Trainingsdaten für die Modellbildung ermittelt werden. Dabei gilt es, hauptsächlich den Messbereich und die minimale Anzahl an Messungen für ein gutes Modell zu definieren. Sind Bereiche



Numerisches Modell vom Drehmoment

vorhanden, die im Vergleich zu anderen Bereichen eine übermäßig große Menge von Daten aufweisen, so werden diese höher gewichtet und die Modelle werden in diesem Bereich genauer. Um den passenden Versuchsplan zu ermitteln, werden deshalb DoE-Pläne (DoE: Design of Experiment) basierend auf Erfahrungen und der statistischen Versuchsplanung erstellt.

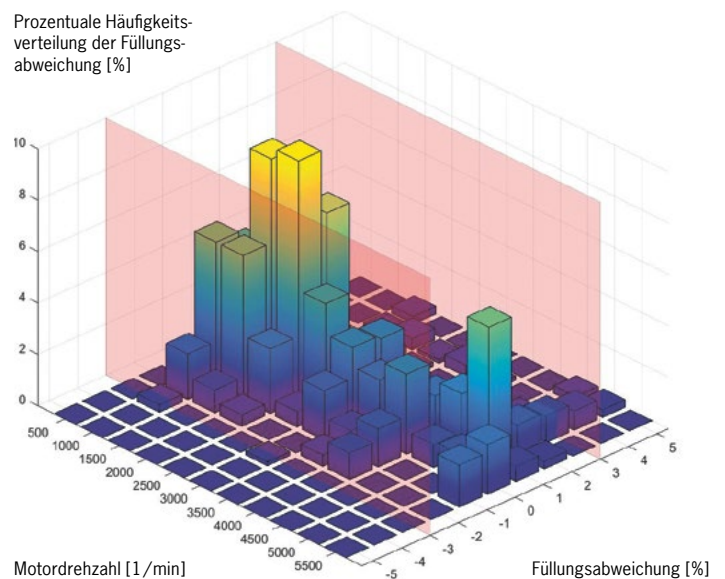
Auswahl und Prüfung von Modellen durch grafische Darstellung

Für die Abbildung des Zusammenhangs zwischen Ein- und Ausgangsgrößen eines Kennfeldes ist die Wahl eines geeigneten mathematischen Modells entscheidend. Um also das für den jeweiligen Anwendungsfall optimale Modell auszuwählen, bedarf es einer Reihe von weiteren Untersuchungen anhand von Gütekriterien. Diese basieren auf statistischen und grafischen Analyseverfahren, die im Rahmen einer definierten Auswertungsmethode systematisch geprüft werden.

Die Übereinstimmung von Messwert und Erwartungswert des Modells am jeweiligen Betriebspunkt ist das Ziel der Modellierung. Demnach prüft der Ingenieur zunächst, ob sämtliche modellierten und gemessenen Punkte auf einer Ursprungsgeraden mit der Steigung eins liegen (siehe Abbildung auf Seite 48 oben). Für eine weitere Modellbewertung bietet sich unter anderem die Methode der kleinsten Fehlerquadrate an, welche durch Regression die Quadratsumme der Modellfehler (Residuen) minimiert. Über die grafische Darstellung der Verteilung

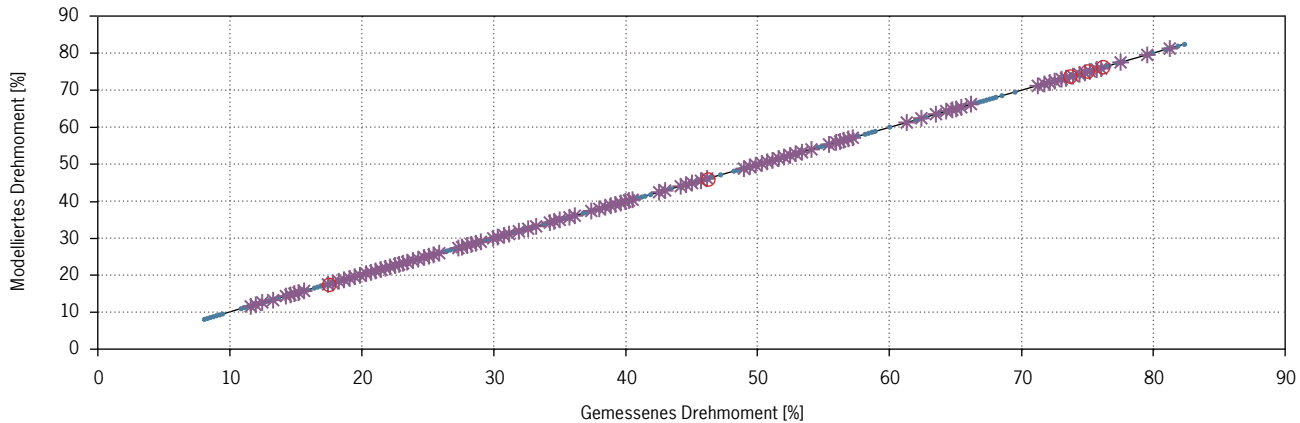
der Residuen (siehe Abbildung auf Seite 48 Mitte) kann dann die Modellgüte beurteilt werden. Gleich verteilte Residuen weisen auf ein geeignetes Modell hin. Weitere mathematische Beziehungen erlauben eine noch detailliertere Modellauswahl.

Die Kennfelder und Kennlinien, die mittels numerischer Modelle kalibriert wurden, bilden den wesentlichen Teil der Applikation des Füllungs- und des Momentenmodells. Ihre >

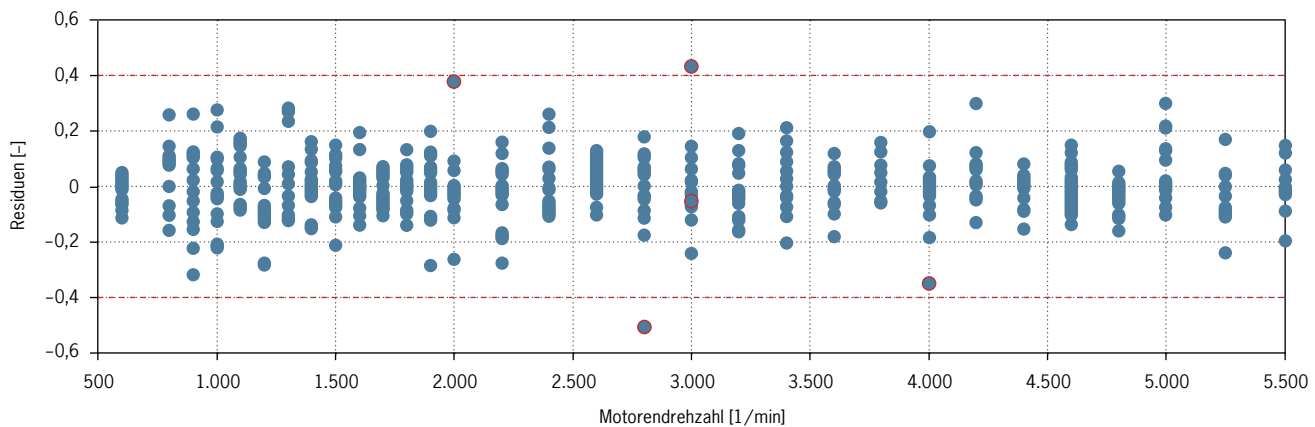


Häufigkeitsverteilung der Füllungsabweichung über die Motordrehzahl

Modelliertes vs. gemessenes Drehmoment [%]



Verteilung der Residuen über die Motordrehzahl



Prüfung der Modellgüte

Verifizierung erfolgt zunächst durch Simulation und erst danach am Motorprüfstand. Füllungs- und Momentenmodell werden dafür in eine Simulink-Umgebung integriert und die Ergebnisse der modellbasierten Kalibrierung als Kennfelder geladen. In dieser virtuellen Umgebung kann dann geprüft werden, ob Drehmoment und Zylinderfüllung auch bei Veränderung von Eingangsparametern wie Ventilsteuerzeiten oder Zündwinkel immer noch den hohen Anspruch an die Genauigkeit erfüllen. Ein Teil der systematischen Auswertung besteht darin, die Häufigkeitsverteilung der Differenz zwischen der gerade applizierten Zylinderfüllung und der gemessenen Zylinderfüllung darzustellen (siehe Abbildung auf Seite 47 unten). Somit können Unstimmigkeiten in der Kalibrierung frühzeitig erkannt und eventuell durch den Einsatz eines Optimierers nachverbessert werden. Eine systematische und definierte Auswertungsmethode ermöglicht eine exakte Vorhersage über die Qualität der Kalibrierung.

Datensätze übertreffen

Anforderungen an Genauigkeit

Der alternative Ansatz zur Füllungs- und Momentenbedatung durch Invertierung der Rechenlogik und numerische Modelle hat sich bei Porsche Engineering bewährt. Die modellbasierte Applikation wird auch für zahlreiche ECU-interne Bestimmungen motorrelevanter Parameter wie Abgastemperatur und Abgasgegendruck erfolgreich eingesetzt. Die mathematische Abbildung der physikalischen Zusammenhänge im Verbrennungsmotor in Verbindung mit Algorithmen in einer Matlab- oder Simulink-Umgebung ist so präzise, dass die Anforderungen an die Genauigkeit der Bedatung sogar übertroffen werden. Gleichzeitig ist die Methodik der Applikation sehr effizient, weil man im Vergleich zu den Solververfahren in kürzerer Zeit mit einer geringeren Anzahl von Versuchen auskommt. ■

IMPRESSUM

Porsche Engineering

MAGAZIN

AUSGABE 2/2016



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

Weng Druck GmbH, Dinkelsbühl

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.



www.porsche-engineering.de



Porsche empfiehlt Mobil 1 und 

Am Anfang haben auch viele gefragt, wozu man eine Gitarre an Strom anschließen sollte.

Der neue Panamera 4 E-Hybrid.

Tonangebend. Mit einem maximalen Drehmoment von 700 Nm für mehr Beschleunigung. Bei gleichzeitig hoher Effizienz durch ein rennsportlerprobtes Hybridkonzept. Mit aktivem Allradantrieb und Boost-Funktion für noch mehr Adrenalin in Ihrem Alltag. Jetzt starten: www.porsche.de/Panamera



PORSCHE